



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TOPI KÖNKÖ  
DATA-ANALYYTTINEN LÄHESTYMISTAPA  
AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN MITOITTAMISEEN  
Diplomityö

Tarkastaja: professori Samuli Pekkola  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
28. syyskuuta 2018

## TIIVISTELMÄ

**TOPI KÖNKÖ:** Data-analyttinen lähestymistapa aurinkosähköjärjestelmän mitoittamiseen

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 71 sivua

Marraskuu 2018

Tietojohtamisen diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Tiedon ja osaamisen hallinta

Tarkastaja: professori Samuli Pekkola

Avainsanat: turvetuotanto, optimointi, aurinkoenergia, pumppaus, data-analyysi

Tutkimuksessa tarkasteltiin aurinkosähköjärjestelmän soveltuvuutta turvetuotannon vesien pumppauksen energianlähteeksi. Tutkimuksen tavoitteena oli määrittää optimaalinen järjestelmäratkaisu vesien pumppaukseen data-analyysimenetelmillä ja arvioida investoinnin kannattavuus. Järjestelmän kannattavuutta arvioitiin kahden eri kriteerin; vedenlaadun ja investoinnin kannattavuuden, perusteella.

Vedenlaatuosan tutkimus painottui tutkimaan aurinkosähköjärjestelmän tuomia muutoksia pumppaukseen ja sen vaikutusta turvetuotantoalueen vedenkiertoon ja sitä kautta poistuvan veden vedenlaatuun. Tutkimuksessa hyödynnettiin Hirvinevan turvetuotantoalueelle asennetusta aurinkosähköjärjestelmästä kerättyä aineistoa. Investoinnin kannattavuuden ja optimaalisen järjestelmän määrittäminen toteutettiin simuloimalla eri järjestelmäratkaisuja ja selvittämällä se, kuinka paljon vettä kyetään pumppaamaan aurinkosähköjärjestelmän tuottamalla energialla.

Tutkimuksessa todettiin, että Hirvinevan aurinkosähköpumppaamo ei toimi etukäteen oletetulla tavalla ja investointi ei ole kannattava. Jos Hirvinevan pumppaamo toimisi kuten oli etukäteen oletettu ja pumpulta vaadittavaa nostokorkeutta saataisiin pienennettyä, kyettäisiin mitoittamaan pienempi aurinkosähköjärjestelmä. Tämä mahdollistaisi järjestelmän mitoittamisen pienemmäksi, jolloin optimaalinen aurinkosähköjärjestelmä turvetuotannon vesien pumppaukseen olisi järjestelmä, jossa 4.16 kW<sub>p</sub> kennosto ja 275 Ah akusto syöttäisi 1.4 kW pumppua.

Vedenlaadun osalta tutkimuksessa havaittiin, että järjestelmän myötä asennettu pumppu tuottaa tasaisemman virtaaman turvetuotantoalueen vedenkiertossa. Vaikka uusi pumppu vaikuttaa vedenkiertoon, tutkimuksessa ei kyetty havaitsemaan muutosta turvetuotantoalueen vedenlaadussa. Tutkimustulosten perusteella todettiin, että edes optimaalinen aurinkosähköjärjestelmä ei olisi kustannustehokas ratkaisu turvetuotantoalueen vesien pumppaukseen.

## ABSTRACT

**TOPI KÖNKÖ:** Data-analytical approach to measure a photovoltaic system

Master of Science Thesis, 71 pages

November 2018

Master's Degree Program in Information and Knowledge Management

Major: Information and Knowledge Management

Examiner: Professor Samuli Pekkola

Keywords: peat production, optimizing, solar energy, pumping, data-analysis

This study examined the suitability of a photovoltaic system as an energy source for water pumping in the production of peat. The aim of the study was to determine the optimal system solution for water pumping by methods of data-analysis and to assess the investment's cost-effectiveness. To assess the profitability of the system, the following criteria were used: the quality of the water and the cost-effectiveness of the investments.

For the analysis of the quality of the water, the study focused on examining the photovoltaic system's effects in water pumping and its impact on the peat production area's water flow and outgoing water quality. The study used the data from a photovoltaic system which has been installed in Hirvineva's peat production area. The cost-effectiveness of the investment and optimal photovoltaic system determination was done by simulating different photovoltaic system solutions and solving how much water could be pumped with the energy generated by a photovoltaic system.

The study found that Hirvineva's photovoltaic system did not work as it was anticipated and that is not cost-effective investment. If the system would operate as it had been assumed in advance and if the pump's lifting height would be set lower, it would be possible to measure a smaller photovoltaic system. This allows the system to be dimensioned smaller, resulting in an optimal photovoltaic system. The optimal system would be a system with a 4.16 kWp solar cell and a 275 Ah battery inputting a 1.4 kW pump.

Regarding the water quality, the study found that installation of a new water pump with the photovoltaic system will generate a smoother water flow in a peat production area. Although the new pump affects the water flow, the study was not able to detect changes in the quality of the water. The results of this study demonstrated that even the optimal photovoltaic system would not be a cost-effective solution for water pumping in the production of peat.

## ALKUSANAT

Diplomityö toteutettiin Vapo Oy:lle osana aurinkosähköpumppaamo -projektia. Työ aloitettiin kesällä 2017 ja saatettiin päätökseen syksyllä 2018. Haluan kiittää Vapo Oy:tä ja sen henkilöstöä saamastani mahdollisuudesta tehdä diplomityö aiheesta, jossa pääsin soveltamaan tietojohdamisen ja aikaisempia sähkötekniikan opintojani. Yrityksestä haluan erityisesti kiittää Ari Erkkilää hänen laadukkaasta ohjauksesta työn aikana ja Roosa Jokisuu-Pärnästä hänen avusta diplomityön asiasisällön tarkastamisesta. Tämän lisäksi kiitän myös Juha Korpea ja Timo Niuraa heidän tarjoamastaan asiantuntijuudestaan turvetuotannosta ja vesienkäsittelystä työn aikana.

Tampereen teknillisessä yliopistossa diplomityön valvojana ja tarkastajana toimi professori Samuli Pekkola. Haluan kiittää häntä hänen valaisevista ja rakentavista kommentista etenkin diplomityöni viimeistelyn aikana. Tahdon tässä kohtaa muistaa myös ystäviäni yliopistolta, joiden ansiosta pitkät päivät yliopistolla tuntuivat huomattavasti lyhyemmiltä.

Viimeiseksi haluan kiittää vanhempiani ja veljeäni siitä tuesta, jonka he ovat antaneet minulle niin nuoruus- ja opintovuosieni kuin diplomityöni aikana. Heidän osoittamansa tuki on ollut minulle korvaamatonta.

Tampereella, 09.11.2018

Topi Könkö

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Tutkimuksen taustaa.....	1
1.2	Tutkimuksen tavoite.....	4
1.3	Tutkimuksen vaiheet .....	5
1.4	Tutkimustulosten esittäminen .....	6
1.5	Työn rakenne.....	7
2.	TUTKIMUSKATSAUS.....	9
2.1	Data-analyysi.....	9
2.2	Aurinkosähköjärjestelmä vedenpumpppauksessa .....	10
2.2.1	Aurinkosähköjärjestelmän mitoitus .....	11
2.2.2	Aurinkosähköjärjestelmän investointilaskelmat .....	16
2.3	Turvetuotannon vesien vedenlaatu.....	17
3.	TUTKIMUSMENETELMÄT JA -AINEISTO .....	20
3.1	Pumppaustavan vaikutus lähtevän veden laatuun .....	20
3.1.1	Lähtevän veden virtaus .....	20
3.1.2	Vedenlaatu .....	24
3.2	Aurinkosähköjärjestelmän kannattavuus.....	25
3.3	Käytettävät aineistot.....	26
4.	PUMPPAAMON MALLINTAMINEN .....	28
4.1	Järjestelmien tuottamien käyttötuntien määrittäminen .....	28
4.2	Järjestelmän soveltaminen pumppaamoille.....	31
4.2.1	Pumppaustarpeen määrittäminen .....	31
4.2.2	Pumppukokojen valinta.....	35
4.2.3	Pumppaamon yhdistäminen luotuun malliin.....	38
4.3	Vertaaminen todelliseen toimintaan.....	38
4.3.1	Pumppaamon pumppujen tarkastaminen .....	40
4.3.2	Affiniteettilain soveltuminen koekohteella.....	42
4.3.3	Pumppaustarpeen tarkastaminen.....	44
4.4	Mallin muokkaus investointilaskelmiin .....	46
4.4.1	Investointirajan määrittäminen.....	48
5.	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU.....	50
5.1	Virtaus mittapadolla .....	50
5.2	Muutokset vedenlaadussa.....	53
5.3	Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmän kannattavuus.....	55
5.4	Optimaalinen järjestelmä kuivatusvesien pumppaukseen.....	58
6.	POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	61
6.1	Mitoitusprosessi .....	61
6.2	Veden virtaama ja vedenlaatu .....	62
6.3	Optimaalinen järjestelmä.....	63
6.4	Data-analyysin rooli mitoituksessa .....	64

6.5	Johtopäätelmät.....	64
6.6	Tutkimuksen arviointi ja jatkotutkimusaiheet.....	66
7.	LAINATUT LÄHTEET .....	68

## KUVALUETTELO

<i>Kuva 1.1. Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmä.....</i>	<i>4</i>
<i>Kuva 2.1. Prosessi akuttoman aurinkosähköjärjestelmän valinnalle. (Rawat;Kaushik;&amp; Lamba, 2016) .....</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 2.2. Prosessi akustollisen aurinkosähköjärjestelmän valinnalle. (Rawat;Kaushik;&amp; Lamba, 2016) .....</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 2.3. Martiren, Glaizen, Joubertin ja Rouvieren mallintama järjestelmä. (Martire;Glaize;Joubert;&amp; Rouviere, 2008) .....</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 2.4. Bouzidin mallintama aurinkosähköjärjestelmä. (Bouzidi, 2013) .....</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 2.5. Matemaattinen malli optimaalisen aurinkosähköjärjestelmän laskentaan. (muokattu lähteestä Muhsen;Khatib;&amp; Nagi, 2017).....</i>	<i>15</i>
<i>Kuva 2.6. Virtaamapiikit mittapadon virtaamassa Joutsuolla 12.03.2016. ....</i>	<i>19</i>
<i>Kuva 3.1. Tutkimusprosessi pumppauksen vaikutuksesta vedenlaatuun. ....</i>	<i>20</i>
<i>Kuva 3.2. Lähtevän veden virtauksen ajallinen osuus eri virtausalueilla. ....</i>	<i>21</i>
<i>Kuva 3.3. Lähtevän veden vesimäärän jakaantuminen eri virtausalueille. ....</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 3.4. Virtaamien hajontojen suhdeluvut eri kuukausilta keskiarvovirtaamien funktiona. ....</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 3.5. Normaalijakauma. (Grant High School Mathematics, 2012) .....</i>	<i>23</i>
<i>Kuva 3.6. Reduktioissa tapahtuvat muutokset.....</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 3.7. Investoinnin kannattavuustutkinnan eri vaiheet. ....</i>	<i>26</i>
<i>Kuva 4.1. Eri kuukausien pumpputuntien keskiarvot eri akustovaihtoehtoilla 2 kW pumpulla ja 5.2 kWp kennostolla. ....</i>	<i>30</i>
<i>Kuva 4.2. Turvetuotantokentän vesienpuhdistusrakenteet. (Hakalahti-Siren, 2015) ....</i>	<i>32</i>
<i>Kuva 4.3. Viikkotasolla esitetyt mittapadon keskiarvovirtaamat hehtaaria kohden.....</i>	<i>33</i>
<i>Kuva 4.4. Alueelliset erot mittapadon virtaamien osalta kuukausitasolla.....</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 4.5. Pumppaamon tyyppikuva mitoitusarvoista. (Alatalo &amp; Marttila, 2011).....</i>	<i>37</i>
<i>Kuva 4.6. Valittujen pumppujen pumppukäyrät, A) MT -tyyppisten ja B) LT - tyyppisen. ....</i>	<i>37</i>
<i>Kuva 4.7. Järjestelmien tuottamien pumpputuntien määrä ja tarve kuukausitasolla. ....</i>	<i>38</i>
<i>Kuva 4.8. Aurinkovoimajärjestelmällä sähköistettävän pienen pumpun käyttötunnit. ....</i>	<i>39</i>
<i>Kuva 4.9. Hirvinevan pienen pumpun (2 kW) tuottokäyrä.....</i>	<i>41</i>
<i>Kuva 4.10. A) Joutsuon ja B) Suljetunnevan pumppujen virtaamat eri pyörimisnopeuksilla.....</i>	<i>42</i>
<i>Kuva 4.11. Mittapadon laskettujen ja todellisten keskiarvovirtaamien vertaaminen. ....</i>	<i>45</i>
<i>Kuva 4.12. Elokuun 2017 päivittäiset keskiarvovirtaamat Hirvinevalla. ....</i>	<i>46</i>
<i>Kuva 5.1. Kuukausittaiset keskiarvovirtaamat eri vuosilta. ....</i>	<i>50</i>
<i>Kuva 5.2. Lähtevän veden ajallinen jakaantuminen virtaaman eri suuruuksille ennen järjestelmän asennusta ja asennuksen jälkeen. ....</i>	<i>51</i>

<i>Kuva 5.3. Lähtevän veden vesimäärän jakaantuminen virtaaman eri suuruuksille ennen järjestelmän asennusta ja asennuksen jälkeen. ....</i>	<i>52</i>
<i>Kuva 5.4. Mittapadon virtaaman hajonta virtaaman funktiona ennen järjestelmän asennusta ja tämän jälkeen. ....</i>	<i>53</i>
<i>Kuva 5.5. Reduktiot tarkasteltavista arvoista vuosilta 2013-2017. ....</i>	<i>54</i>
<i>Kuva 5.6. Taajuusmuuttajan vaikutuksen tarkastelu vedenlaatuun. ....</i>	<i>55</i>
<i>Kuva 5.7. Investointirajat Hirvinevan järjestelmälle laskettuna eri investointikoroilla. ....</i>	<i>57</i>



## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$A$	Paneelien pinta-ala
$AUE$	Käytetyn energian määrä
$C_i$	Vuosittainen korjaus
$C_{in}$	Tulevan veden pitoisuus
$C_{out}$	Lähtevän veden pitoisuus
$CV_d$	Dieselin lämpöarvo
$d$	Putken halkaisija
$E$	Aurinkosähköjärjestelmän tuottama teho
$g$	Vetovoiman kiihtyvyys
$H$	Nostokorkeus
$HA$	Alkuinvestointi
$H_D$	Dynaaminen nostokorkeus
$i$	Käytettävä laskentakorko
$I_{TLT}$	Neliömetrin tasoon saapuvan auringonsäteilymäärä
$l$	Putken pituus
$JA$	Investoinnin jäännösarvo
$k_A$	Kustannukset aurinkojärjestelmällä
$k_D$	Kustannukset pelkällä aggregaattijärjestelmällä
$MW_{ds}$	Dieselin käytön vähentymisen rahallinen arvo
$n$	Pitoaika
$NVP$	Investoinnin nykyarvo
$NPV_d$	Dieselin käytön vähentymisen rahallinen arvo nykyajassa
$P_a$	Pumpun akseliteho
$Q$	Tilavuusvirta
$r$	Korrelaatiokerroin
$red.$	Pitoisuusreduktio
$s_t$	Investoinnin synnyttämät nettotuotot
$t$	Aika vuosina
$t_a$	Aurinkosähköjärjestelmän käyttöikä
$t_p$	Pumpun toiminta-aika vuorokaudessa
$v$	Virtausnopeus
$v_p$	Pumpulta vaadittu tuotto
$\bar{v}_p$	Pumpun tuoton keskiarvo vuorokaudessa
$\eta_{p,dep}$	Aggregaatin hyötysuhde
$\bar{x}$	Otoskeskiarvo
$x_i$	Otosarvo
$\bar{y}$	Otoskeskiarvo
$y_i$	Otosarvo
$\eta_M$	Sähkömoottorin hyötysuhde

$\eta_K$	Kennoston hyötysuhde
$\eta_p$	Pumppauksen hyötysuhde
$\eta_{PR}$	Järjestelmän hyötysuhde
$\eta_S$	Säädön hyötysuhde
$\rho$	Virtausaineen tiheys
$\Delta p_v$	Putkiston ja rakenneosien virtausvastus

# 1. JOHDANTO

Vapo Oy on tehnyt kestävän kehityksen yhteiskuntasitoumuksen ympäristöministeriön kanssa, jossa se sitoutuu edistämään kestävästä kehitystä kaikessa työssään ja toiminnassaan. Turvetuotannossa kestävästä kehitykseen pyritään muun muassa tehostamalla vesienkäsittelyä. Vesienkäsittelyn osalta Vapossa on haluttu selvittää mahdollisia keinoja vesienkäsittelyn tehostamiseen pintavalutuskentällä ja kuinka sitä kyettäisiin tekemään energiatehokkaammin.

## 1.1 Tutkimuksen taustaa

Turvetuotannossa suoalueelta poistetaan ensin pintakasvillisuus ja se kuivatetaan ojittamalla. Vuosittain alueelta jyrsitään suoalueen pintakerros, joka kuivatetaan ennen turpeen keräämistä. Kentän kuivatuksen yhteydessä suolta valuu kuivatusvettä turvetuotantoalueen vesienkäsittelyrakenteisiin. Kuivatusveteen huuhtoutuu turvetuotannossa kiintoainetta, ravinteita, humusta ja rautaa (Ympäristöministeriö, 2015).

Ennen kuin kuivatusvesi päätyy luonnolliseen kiertoon, se täytyy käsitellä turvetuotannon ympäristöohjeiden mukaisesti. Turvetuotantokentältä valuva kuivatusvesi ohjataan sarkaojien ja laskeutusaltaan kautta pumppualtaaseen, josta vesi pumpataan pintavalutuskentälle. Pintavalutuskentän jälkeen käsitelty kuivatusvesi kulkeutuu mittapadon kautta luonnolliseen kiertoon. Tämä on vakiintunut parhaaksi käytettävissä olevaksi tekniikaksi turvetuotannon kuivatusvesien käsittelyssä. (Väyrynen, ym., 2008)

Pintavalutuskenttä on kosteikkotyyppi, joka on luotu joko luonnontilaiselle tai ojitetulle suoalueelle. Suoalueella pitää olla vähintään puolen metrin turvekerros, jotta suoalueelle voidaan perustaa pintavalutuskenttä. Kentän tarkoitus on puhdistaa kentän läpi virtaava vesi, joka virtaa kentällä olevan turvekerroksen läpi (Ympäristöministeriö, 2015). Pintavalutuskentän turvekerros pidättää fosfaattia, fosforia ja ammoniumtyyppiä sekä kiintoainetta ja rautaa. Turvekerroksen pinnalta poistuu epäorgaanista tyyppiä. Kasvillisuus pintavalutuskentällä pidättää kiintoaineeseen sitoutuneita ravinteita, kuten fosfaattifosforia ja ammoniumtyyppiä (Postila, ym., 2011).

Turvetuotannossa pintavalutuskentän käyttötarkoitus on puhdistaa turvetuotantoalueelta tulevaa kuivatusvettä ennen kuin se kulkeutuu vesistöihin pidättämällä vedestä kiintoainetta, rautaa, tyyppiä, fosforia ja orgaanista ainetta. Turvetuotannossa pintavalutuskentät parantavat vesien puhdistusta, auttavat alueen tyyppillisen suoluonnon säilyttämisessä ja ennallistamisessa ojitetuilla alueilla sekä pidentävät veden viipymää kentällä, mikä tasaa tulvahuippuja. (Cleanwaters, 2017)

Kentän suuren merkityksen vuoksi sen toimintaa seurataan säännöllisillä vedenlaatumittauksilla. Vedenlaatumittauksissa otetaan vesinäytteitä kentälle tulevasta ja lähtevästä vedestä tarkkailusuunnitelman perusteella. Mittaukset suorittaa ulkopuolinen, riippumaton konsultti. Mittauksissa määritetään standardoiduilla menetelmillä kiintoaine, kemiallinen hapenkulutus, kokonaisfosfori, kokonaistyyppi, pH ja sameus. (Ympäristöministeriö, 2015)

Pintavalutuskentälle tuleva kuivatusvesi on riippuvainen pumpppaamoista, jotka pumpaavat kuivatusvettä kentälle. Tällä hetkellä vesien pumpppauksessa käytetään kahta erilaista pumpppujen sähköistämistapaa. Ensisijaisena tavoitteena on kytkeä pumpppaamo sähköverkkoon. Joissakin tilanteissa turvetuotantoalue on liian kaukana sähköverkosta, jotta kyseisen alueen pumpppaamo voitaisiin kytkeä siihen. Näissä tilanteissa pumpppaamo sähköistetään dieselaggregaatilla. Kummassakin pumpppaamoratkaisussa pumpppaamon pumpppu mitoitetaan tulvatilanteiden mukaisesti.

Suurin kustannus pumpppaamoista muodostuu energiankulutuksesta. Teollisuudessa on arvioitu, että 20 vuoden aikajanelä 95 prosenttia pumpppujen tuottamista kustannuksista tulee energiankulutuksesta ja loput alkuinvestoinnista ja huoltokustannuksista (Department of the Environment, Transport and The Regions, 1998). Pumpppujen mitoitusperiaatteen vuoksi pumpun kapasiteetti on suurimman osan ajasta huomattavasti suurempi kuin mitä pumpppaustarve on. Jos kuivatusvesien pumpppausta mietitään affiniteettilain perusteella, jonka mukaan pumpppaukseen vaadittava teho on kuutiollisessa suhteessa tilavuusvirtaan (Ford, 2011), pumpppaus suurella pumpulla ei ole energiatehokasta.

Jos pumpppaus olisi mahdollista toteuttaa puolet pienemmällä virtaamalla, pumpun tarvitsisi olla affiniteettilain perusteella vain kahdeksasosan nykyisestä tehosta. Tämän mukaan saman vesimäärän pumpppaamiseen kahdeksasosan pienemmällä pumpulla kuluttaisi vain neljäsosan siitä energiasta, mitä pumpppaukseen käytettäisiin suurella pumpulla. Kustannuksien kannalta on siis tärkeää, että pumpppu mitoitetaan tilanteeseen sopivaksi, koska ylimitoitettu pumpppu vaatii suuremman alkuinvestoinnin ja sen ylläpitokustannukset ovat suuremmat.

Suuremman energiankulutuksen lisäksi suuri pumpppu pumpppaa kuivatusvesiä pintavalutuskentälle suurella virtaamalla lyhyessä ajassa. Ihmeen, Heikkiseen ja Laakson (1991) tekemässä tutkimuksessa on kuitenkin todettu, että tehokas vedenpuhdistus pintavalutuskentällä edellyttää, että puhdistettavan veden jakaantuu koko kentälle tasaisesti niin pituus- kuin leveyssuunnassa (Ihme;Heikkinen;& Lakso, 1991).

Pintavalutuskentälle ei myöskään saa muodostua oikovirtausta aiheuttavia ojia, joista kuivatusvesi pääsisi kiertämään suodattavan turpeen ohitse. Kun pumpppaus toteutetaan suurella virtaamalla pintavalutuskentälle aiheutua oikovirtausuomia, jotka aiheuttavat oiko-

virtausta (Ihme;Heikkinen;& Lakso, 1991). Pumppauksen tapahtuessa pienemmällä virtaamalla olisi todennäköistä, että pintavalutuskentälle muodostuisi vähemmän oikovirtauksia.

Vastaavasti kenttä ei saa myöskään tyhjentyä liikaa, ettei pintavalutuskentällä oleva kasvillisuus kärsisi. Suurella pumpulla pintavalutuskentälle muodostuu kuivia kausia, jolloin vettä ei pumpata kentälle (Ihme;Heikkinen;& Lakso, 1991). Pumppauksen tapahtuessa pienemmällä, mutta jatkuvalla virtaamalla kentälle pumpattaisiin vettä jatkuvasti. Tämän myötä pintavalutuskentälle muodostuisi vähemmän kuivia kausia.

Joten, jos pumppaus toteutettaisiin pienemmällä, mutta jatkuvalla virtaamalla, pintavalutuskentän toiminta voi mahdollisesti tehostua. Kentän toimiessa tehokkaammin, se pidättäisi enemmän kiintoainetta, rautaa, typpeä, fosforia ja orgaanista ainetta turvetuotannon kuivatusvesistä. Sen oletetaan auttavan eritoten fosforin sitoutumista turvekerrokseen. Tämän lisäksi pumppaus pienemmällä virtaamalla vähentäisi pumppualtaan pohjalle kertyneen kiintoaineen pumppausta pintavalutuskentälle.

Pumppaus pienemmällä virtaamalla olisi myös energiatehokkaampaa affiniteettilain perusteella. Lisäksi ympäristöministeriön julkaisemassa turvetuotannon ympäristönsuojeluohjeissa korostetaan mahdollisimman tasaista pumppausta vesienkäsittelyrakenteille (Ympäristöministeriö, 2015). Tämän vuoksi Vapossa on ryhdytty selvittämään pumppaamoiden optimointia, jotta pintavalutuskenttien toiminta ja pumppaamoiden energiatehokkuudet paranisivat Vapon ympäristötavoitteiden mukaisesti.

Vuonna 2015 Vapossa käynnistettiin kaksi projektia, joiden tavoitteena on pyrkiä entistä energiatehokkaampaan pumppaamoon ja lisäksi tehostaa pintavalutuskentän vesienkäsittelyä. Tasaisempi pumppaus -projektissa sähköverkkoon liitettuihin pumppaamoihin asennettiin taajuusmuuttaja, joka pienentää pumpun pyörimisnopeutta tasaisemman virtaaman tuottamiseksi. Aurinkosähköjärjestelmä -projektissa dieselaggregaatilla toteutetuille pumppaamoille asennettiin jo olemassa olevan pumpun rinnalle pienempi pumppu, joka sähköistettäisiin aurinkosähköjärjestelmällä.

Aurinkosähköprojektin puitteissa kolmelle turvetuotantoalueelle asennettiin aurinkosähköjärjestelmä. Kuvassa 1.1 on esitetty aurinkosähköjärjestelmä, joka on asennettu Hirvinevan turvetuotantoalueelle. Entuudestaan alueella olevan dieselaggregaatin ja polttoainesäiliöiden rinnalle asennettiin aurinkokennosto ja järjestelmäkaivo. Järjestelmäkaivoon asennettiin aurinkosähköjärjestelmän sähköiset komponentit, kuten järjestelmän akusto ja invertteri. Pumppukaivossa uusi pumppu lisättiin jo olemassa olevan pumpun rinnalle ja liitettiin samaan putkistoon, jota pitkin pumput pumppaavat vettä pumppualtaasta pintavalutuskentälle.



**Kuva 1.1.** Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmä.

Aurinkosähköjärjestelmäprojektin alussa oli tehty alustavat laskelmat siitä, kuinka paljon aurinkosähköjärjestelmän hankinta tuottaisi säästöjä. Kyseiset laskelmat oli tehty ennen järjestelmäasennuksia ja niiden perusteella järjestelmä olisi taloudellisesti kannattava. Laskelmien mukaan ennustettiin parhaimmillaan 60 000 euron säästöjä 20 vuoden aikana pienentyneiden polttoaine- ja huoltokustannusten myötä.

## 1.2 Tutkimuksen tavoite

Diplomityö alkoi kesällä 2017 ja sen tarkoituksena oli luoda teoreettinen malli aurinkosähköjärjestelmällä toteutettavasta turvetuotannon vesien pumppauksesta ja ottaa kantaa aurinkosähköjärjestelmän kannattavuuteen. Malli luotiin aurinkosähköjärjestelmäprojektin koekohteista kerätyn aineiston ja lähdeteorioiden avulla. Tavoitteena oli määrittää eri järjestelmävariaatioita turvetuotannon vesien pumppaukseen erilaisilla kennosto-, akusto- ja pumppuratkaisuilla. Tavoitteena oli löytää optimaalinen järjestelmä ja ottaa kantaa siihen, onko aurinkosähköjärjestelmä taloudellisesti kannattava turvetuotannon vesien pumppauksessa ja miten kannattavuutta kyettäisiin tehostamaan.

Aurinkosähköjärjestelmän lisäksi tutkittiin myös itse pumppaamalla tapahtuvaa muutosta. Hirvinevan turvetuotantoalueelle aurinkosähköjärjestelmällä sähköistetään pientä pumppua, joka on asennettu pumppaamolla aikaisemmin olemassa olevan pumpun rinnele. Pienen pumpun tarkoituksena on tuottaa tasainen virtaus pintavalutuskentälle. Pumpun myötä pumppaamon kuivatusvesien pumppaus pintavalutuskentälle tapahtuu tasaisemmalla virtaamalla kuin ennen järjestelmäasennusta. Tavoitteena oli havainnoida, että vaikuttaako pumppaamalla tehtävät muutokset pumppauksen ja pintavalutuskentän toimintaan.

Edellä esitettyjen taustatietojen ja tavoitteiden perusteella muodostettiin tutkimuskysymykset, joihin tutkimuksella pyritään vastaamaan. Tavoitteena oli vastata alla esitettyihin tutkimuskysymyksiin ja muodostaa johtopäätös siitä, soveltuuko aurinkosähköjärjestelmä turvetuotannon vesien pumppauksessa energianlähteeksi.

- *Kuinka data-analytiikkaa voidaan hyödyntää aurinkosähköjärjestelmän mitoittamisessa?*
- *Miten aurinkosähköjärjestelmä toimii turvetuotannon vesien pumppauksessa?*
- *Mikä olisi optimaalinen aurinkosähköjärjestelmä turvetuotannon vesien pumppauksessa?*
- *Miten pumppausta olisi mahdollista tehostaa?*
- *Vaikuttaako pumppaustavan muutos pintavalutus kentän toimintaan?*

### 1.3 Tutkimuksen vaiheet

Diplomityön alussa tutustuttiin turvetuotannon vesien pumppaukseen koekohteissa ja keskusteltiin asiantuntijoiden kanssa siitä, mitkä tekijät vaikuttavat vedenlaatuun. Tämän perusteella keskityttiin turvetuotantoalueelta kerätyn kvantitatiivisen aineiston käsitteelyyn data-analyysin keinoin. Käsitelty aineisto oli aineistosta riippuen vuosista 2015 – 2017 alkaen vuoden 2018 elokuulle asti. Tutkimus toteutettiin hyödyntämällä deduktiivisia ja induktiivisia tutkimusmenetelmiä.

Deduktiivisessa tutkimusmenetelmässä ei ole tarkoitus muodostaa uutta teoriaa, vaan pyrkiä muodostamaan havaintoja jo olemassa olevien teorioiden pohjalta. Tutkimusprosessissa, joka noudattaa deduktiivista tutkimustapaa, tutkimusprosessin alkupuolella luodaan joukko hypoteeseja teoriasta, jonka pohjalta muodostetaan itse tutkimusprosessi. Tutkimuksessa muodostettujen tulosten perusteella vahvistetaan/parannetaan testattavaa teoriaa (Kurland., 2000). Kyseistä tutkimustapaa hyödynnettiin tutkimuskokonaisuudessa, joka keskittyi aurinkosähköjärjestelmän analysointiin.

Aurinkosähköjärjestelmän mallin luomisessa teoriakatsaus painottui siihen, miten aurinkosähköjärjestelmä toimii ja mitkä komponentit ovat tärkeitä aurinkosähköjärjestelmän toiminnan kannalta. Lisäksi perehdyttiin aikaisempiin tutkimuksiin kyseisen aiheen pohjalta. Koska aurinkosähköjärjestelmällä sähköistetään pumppua, tutkimuksessa tutustuttiin myös pumppauksen teorioihin ja siihen, mitkä tekijät vaikuttavat pumpun tuottoon ja pumppaukseen tehoon. Aikaisempien tutkimusten pohjalta luotiin teoreettinen malli, jolla määriteltiin aurinkosähköjärjestelmän kannattavuus turvetuotannon vesien pumppauksessa. Luotua mallia verrattiin Hirvinevan turvetuotantoalueen aurinkosähköjärjestelmän toimintaan, jonka perusteella määritettiin Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmän toimintaa. Mallia hyödynnettiin myös investoinnin kannattavuusmäärittelyssä ja optimaalisen aurinkosähköjärjestelmän etsimisessä.

Induktiivista tutkimusmenetelmää hyödynnettiin vedenlaatuosion tutkimuksessa. Menetelmän tavoitteena on tuottaa johtopäätös tehdyistä havainnoista. On kuitenkin huomiotava, että johtopäätös ei välttämättä pidä paikkaansa. Muodostettu johtopäätös on todennäköisin johtopäätös tehdyistä havainnoista (The Metaphysics Research Lab. Stanford University, 2012). Kyseistä menetelmää käytettiin muodostamaan johtopäätös pumppaamalla tapahtuvien muutosten vaikutuksista vedenlaatuun. Vedenlaatuosion tutkimuksessa käytetty aineisto kerättiin vedenlaaturaporteista ja virtaamamittareilta. Näiden pohjalta pyrittiin havaitsemaan muutoksia, jotka pumppaamomuutoksen myötä nousivat esille. Tämän perusteella pyrittiin myös arvioimaan sitä, vaikuttaako tasaisempi pumpaus pintavalutuskentän toimintaan.

Vaikka tutkimus muodostui suurimmaksi osin kvantitatiivisen aineiston käsittelystä, tasaisemman pumppauksen tuottamat muutokset voivat ilmetä myös muilla tavoin. Yksi ilmiö voi olla pienentyneet oikovitaukset pintavalutuskentällä. Tutkimus olisi ollut mahdollista toteuttaa niin, että tutkimukseen sisällytettäisiin myös laadullisen tutkimusmenetelmän keinoja, joissa keskityttäisiin tutkimaan ojissa tapahtuvia muutoksia. Ojissa tapahtuvien muutosten havaitseminen voi viedä useita vuosia, joten tässä tutkimuksessa keskityttiin tutkimaan vain kvalitatiivista aineistoa pintavalutuskentän toiminnan osalta.

Eroavaisuus, joka muodostui induktiivisessa ja deduktiivisessa tutkimustavassa on, että induktiivisessa menetelmässä ei tukeuduttu yhtä paljoa lähdekirjallisuuteen kuin deduktiivisessa tutkimusmenetelmässä. Deduktiivisessa tutkimusmenetelmässä tutkimus perustuu aikaisempiin teorioihin ja siitä syystä kirjallisuuskatsaus on huomattavasti tärkeämpi kuin induktiivisessa menetelmässä. Muuten menetelmät noudattavat samankaltaista tutkimusprosessia, joka on esitetty alla.

1. Tutkimusalueen valinta
2. Tutkimustavoitteen asettaminen
3. Kirjallisuuskatsaukseen tutustuminen
4. Tiedonkeräämismenetelmän valinta
5. Datan kerääminen
6. Datan analysointi
7. Johtopäätökset

## 1.4 Tutkimustulosten esittäminen

Diplomityön tutkimuksessa käytettiin visuaalisen analysoinnin keinoja. Tämän vuoksi tutkimuksessa perehdyttiin tulosten esittämistapojen laatimiseen ja itse aineiston visualisointiin. Tulosten esitystapojen laatimisen osalta perehdyttiin Abelan (2013) kirjoittamaan kirjaan, jossa esitellään esitystapaprosessin eri vaiheita. Abelan esittämä esitystavan suunnitteluprosessin tavoite on pyrkiä esittämään monimutkaiset ja kiistanalaiset tiedot tavalla, joka mahdollistaa informaation nopean sisäistämisen. (Abela, 2013)



Prosessi ottaa markkinoinnillisen lähestymistavan esityksen rakentamiseen ja keskittyy ajatusten välittämiseen yleisölle. Se rakentuu neljästä olennaisesta osiosta, jotka koostuvat yhteensä kymmenestä eri vaiheesta. Olennaiset osiot koostuvat kysymyksistä kuka, mikä, miten ja uudelleen kuka. Jos prosessin mukaisia vaiheita noudattaa, pitäisi kyetä luomaan esitystapa, jolla kyetään tuomaan esitettävä informaatio selkeästi esille. Tärkeimpänä osiona on ymmärtää yleisön luonne ja se, kuinka he parhaiten sisäistävät esitettävän informaation. Tämän avulla valitaan kohdeyleisölle soveltuva esitystapa. Vastaukset edellä esitettyihin kysymyksiin vaikuttavat visualisointitavan suunnitteluun. (Abela, 2013)

Aineiston visuaalisten esitystapojen välillä voi olla huomattavia eroavaisuuksia, mutta niissä on myös tiettyjä yhtäläisyyksiä. Niiden on kyettävä välittämään informaatio selkeästi, jotta viesti tulee esitettyä yleisölle. Kosara (2007) ehdottaa artikkelissaan seuraavia kriteerejä tieteellisen visualisointiin: visualisoinnin pitää perustua aineistoon, sen täytyy luoda kuva ja kuvaajan on oltava luettavissa, sekä esitettävä aineisto kuvaajassa pitää olla tunnistettavissa. (Kosara, 2007)

Berinato (2016) esittää artikkelissaan aineiston visualisoinnista sen, että visuaalisen esitystapaan vaikuttaa aineiston tyyppi. Tämä voi olla joka laadullista tai määrällistä. Laadullisen aineiston tutkinnassa keskitytään ideointiin ja määrällisen aineiston tutkinnassa teknillisiin esitystapoihin. Aineiston laadun lisäksi esitystapaan vaikuttaa myös visualisoinnin tarkoitus. Tehdäänkö visualisointi dokumentointiin ja havaintojen vahvistamiseen vai hypoteesien testaamiseen. (Berinato, 2016)

Visualisointia hyödynnettiin optimaalisen aurinkosähköjärjestelmän mitoitusprosessin suunnittelussa. Visualisoinnin tarkoituksena oli tutkia luodun mitoitusprosessin toimintaa ja dokumentoida työn tuloksia. Tulosten dokumentoinnissa visualisoinnilla tuotiin esille Hirvinevan kohteen kannattavuutta tulevaisuudessa ja sitä, minkä vuoksi mitoitettu järjestelmä on optimaalinen. Lisäksi visualisoinnilla pyrittiin tuomaan esiin tekijöitä, joiden avulla investoinnin kannattavuutta voitaisiin kasvattaa. Tutkimuksissa aineiston visualisoinnin suunnittelussa käytettiin Abelan esittämiä esitystapojen ja tapoja siitä, miten voidaan valita sopiva visualisointitapa aineistolle.

## 1.5 Työn rakenne

Luvussa kaksi esitetään aikaisempia tutkimuksia, joissa käsiteltävät aiheet ovat verrattavissa tämän tutkimuksen aiheisiin. Tutkimuskatsauksessa esitetään miten aurinkojärjestelmät toimivat ja kuinka niitä on mahdollista mitoittaa. Vedenlaatupuolen tutkimuskatsauksessa tutustutaan tutkimuksiin, joita on aikaisemmin tehty turvetuotannon vesienkäsittelyiden osalta. Kolmannessa luvussa esitellään tutkimusmenetelmä, jonka mukaisesti tutkimus toteutettiin.

Luvussa neljä esitellään, miten aurinkosähköjärjestelmän teoreettinen malli luotiin. Luvussa esitetään tekijät, jotka vaikuttavat aurinkosähköjärjestelmän toimintaan. Näiden pohjalta luodaan aurinkosähköjärjestelmästä ja pumppauksesta malli, jota verrataan Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmän toimintaan. Luvussa tutustutaan tarkemmin myös kuivatusvesien pumppaukseen ja siihen, miten aurinkosähköjärjestelmällä suoritettu vesien pumppaus on toiminut Hirvinevan turvetuotantoalueessa. Lopussa esitetään investointirajan laskemiseen käytetty menetelmä, jota käytetään määrittelemään aurinkosähköjärjestelmän investoinnin kannattavuutta turvetuotannon vesien pumppauksessa.

Viidennessä luvussa esitetään tutkimuksessa muodostuneet tulokset. Ensin esitetään aurinkosähköjärjestelmän vaikutus pintavalutuskentältä lähtevän veden virtausprofiiliin. Toiseksi esitetään se, onko järjestelmä tehostanut pintavalutuskentän vesienkäsittelyä. Kolmanneksi määritetään, että onko Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmä taloudellinen. Viimeiseksi esitetään, mikä olisi optimaalinen aurinkosähköjärjestelmä turvetuotannon vesien pumppauksessa.

Kuudennessa luvussa pohditaan tutkimuksessa käytettyä menetelmää optimaalisen aurinkosähköjärjestelmän mitoittamiseen ja sitä, miten se suhtautuu aikaisempiin tutkimuksiin. Tämän jälkeen käsitellään aurinkosähköjärjestelmän myötä tulleen pumppaustavan vaikutusta pintavalutuskentän vesienkäsittelyyn ja esitellään optimaalinen aurinkosähköjärjestelmä turvetuotannon kuivatusvesien pumppaukseen. Lopussa mietitään data-analyysin roolia tutkimuksessa, esitellään tutkimuksessa tuodut johtopäätökset järjestelmän soveltuvuudesta kuivatusvesien pumppauksessa, arvioidaan toteutettua tutkimusta ja esitetään mahdollinen jatkotutkimuksenaihe.

## 2. TUTKIMUSKATSAUS

Tässä luvussa esitellään aikaisempia tutkimuksia liittyen aurinkosähköjärjestelmillä toteutettuihin pumppaamoihin ja vedenlaatupuoleen liittyen. Ennen näiden käsittelyä esitetään, mitä data-analyysi on, ja esimerkkejä siitä, miten sitä on hyödynnetty aurinkosähköjärjestelmin tutkinnassa. Tämän jälkeen käsitellään aikaisempia tutkimuksia aurinkosähköjärjestelmällä toteutetusta vedenpumppauksesta ja sitä, miten tutkimuksissa optimaalinen aurinkosähköjärjestelmän on määritetty. Vedenlaatupuolella tutkimuskatsauksessa tarkastellaan aikaisempia tutkimuksia, jotka on tehty turvetuotannon vedenlaadusta ja pintavalutuskentästä.

### 2.1 Data-analyysi

Data-analyysissä muodostetaan johtopäätöksiä datasta käyttämällä tunnettuja menetelmiä ja/tai työkaluja. Menetelmien ja työkalujen avulla pyritään löytämään datasta kuvioita tai yhteyksiä (Chandler & Munday, 2016). Data-analyysin tarkoituksena on tuottaa hyödyllistä informaatiota, muodostaa johtopäätöksiä ja tukea päätöksentekoa. Prosessi käsittelee vaiheet datan hankinnasta aina sen esittämiseen asti sisältäen datan keräämisen, tarkastamisen, puhdistamisen, muuntamisen ja mallintamisen. Data-analyysi on mahdollista jakaa neljään vaiheeseen; valmisteluun, esikäsittelyyn, analyysiin ja jälkikäsittelyyn. (Galletto, 2016). Käytännössä kaikki menetelmät, joissa dataa käsitellään, arvioidaan tai vertaillaan keskenään, hyödyntävät data-analyysimenetelmiä.

Behrens (1997) esittää artikkelissaan tutkivan data-analyysin periaatteita ja menettelytapoja. Hän viittaa tutkivalla data-analyysillä menetelmään, jossa joko 1.) painotetaan aineiston ymmärtämistä, 2.) painotetaan aineiston graafista esitystä, 3.) keskitytään alustavan mallin luomiseen ja hypoteesien laatimiseen iteratiivisessa mallinluomisprosessissa, 4.) vankkojen toimenpiteiden, uudelleenmallintamisen ja osajoukkoanalyysien käyttämistä tai 5.) skeptisyyttä ja joustavuutta sen suhteen, mitä menetelmää käytetään. (Behrens, 1997)

Aurinkosähköjärjestelmien osalta data-analyttisiä menetelmiä on käytetty monella eri tavalla. Yksi data-analytiikan käytötapa on luoda algoritmi aurinkosähköjärjestelmien energiantuoton ennustamiseen. Long, Zhang ja Su (2014) analysoivat tekemässään tutkimuksessa neljää eri algoritmia, joista jokainen oli luotu järjestelmän energiantuoton ennustamiseen. Algoritmien luomisessa oli käytetty eri koneoppimisen menetelmiä. Data-analyysin rooli tutkimuksessa oli tuottaa tutkijoille informaatiota siitä, kuinka hyvin ennustavat algoritmit toimivat energiantuoton ennustamisessa. Data-analyttisillä menetelmillä muodostettu johtopäätös tutkimuksessa oli, että algoritmeilla kyettiin ennustamaan

järjestelmän tuottaman energian määrä lähipäiville. Kun ennustuksen ajanväli piteni, ennustuksien tarkkuus pieneni. (Long;Zhang;& Su, 2014)

Rodiek, Best ja Brandhorst (2010) hyödynsivät data-analyysimenetelmiä aurinkosähköjärjestelmien asennusten analysointiin. He tutkivat aurinkosähköjärjestelmän toimintaa kerätyn datan perusteella ja arvioivat järjestelmän energiantuoton tehokkuutta. Tutkimuksessa vertailtiin aurinkosähköjärjestelmän mitoittamisessa käytetyn mallinnusohjelman tuottamia arvioita järjestelmän tuottamasta energiasta todelliseen energiantuottoon. Tavoitteena oli tuottaa lisäinformaatiota aurinkosähköjärjestelmän suunnitteluun tuottamalla tarkkaa ja syvällistä informaatiota järjestelmän suorituskykyyn liittyen. Tutkimuksessa havaittiin, että kyseisessä tapauksessa aurinkosähköjärjestelmä tuotti enemmän energiaa kuin mitoittamisessa käytetty ohjelma ennusti. (Rodiek;Best;& Brandhorst, 2010)

## 2.2 Aurinkosähköjärjestelmä vedenpumppauksessa

Valtaosa kaupallisesti saatavilla olevista vesipumpuista pyöritetään joko sähkö- tai dieselmoottorilla. Alueilla, joissa etäisyys sähköverkkoon on suuri, dieselkäyttöiset pumput ovat suosituin ratkaisu veden pumppauksessa. Näiden dieselkäyttöisten pumppujen ongelmia ovat polttoaineen syötön epävakaous, polttoaineen hinta, korkeat kunnossapitokustannukset ja lyhyet käyttöiät. Näiden ja ympäristötietoisuuden kasvun myötä on ryhdytty etsimään vaihtoehtoisia ratkaisuja veden pumppaukseen. (Aliyu;Hassan;Said;Siddiqui;& Alawami, 2018)

Yksi vaihtoehtoista, joilla pyritään korvaamaan dieselkäyttöiset vesipumput, on aurinkosähköjärjestelmän käyttäminen veden pumppauksessa. Järjestelmät on koettu toimiviksi ratkaisuihin veden pumppaamiseen, koska aurinkoenergian saatavuudella ja vedenpuutteella on suora yhteys toisiinsa. Lisäksi aurinkoenergian määrä on korkea monilla alueilla, joissa sähköverkkoon ei ole mahdollista liittyä. Aurinkoenergian suuren määrän vuoksi alueilla kärsitään kuivuudesta ja siksi alueilla on korkea tarve veden pumppaukselle (Aliyu;Hassan;Said;Siddiqui;& Alawami, 2018).

Aliyua, Hassana, Saida, Siddiquic, Alawamid ja Elamind (2018) kirjoittamassa artikkelissa tutkittiin aurinkovoimajärjestelmiä, joilla on korvattu dieselkäyttöisiä vesipumppeja. Artikkelissa tutkittiin Lähi-Itään ja Aasiaan rakennettujen järjestelmien toimintaa. Kohteiden perusteella arvioitiin, että pienillä pumppauskapasiteeteilla aurinkosähköjärjestelmällä toteutettavat ratkaisut veden pumppauksessa ovat taloudellisempia kuin dieselkäyttöiset tai tuulivoimalla sähköistettävät pumput. (Aliyu;Hassan;Said;Siddiqui;& Alawami, 2018)

Muhsenin, Khatibin ja Naginin (2017) kirjoittamassa artikkelissa arvioitiin aurinkosähköjärjestelmien suunnittelumenetelmien lisäksi järjestelmien ohjausta ja niiden toimi-

vuotta käytössä. Heidän artikkelissaan nousi esille, että aurinkosähköjärjestelmien suunnittelussa on useita haasteita. Haasteet liittyvät järjestelmien suunnittelukäytänteisiin, mallintamis- ja ohjausmenetelmiin, saatavaan dataan ja asennuspaikalla ilmeneviin haittoihin kuten varjoihin. (Muhsen;Khatib;& Nagi, 2017)

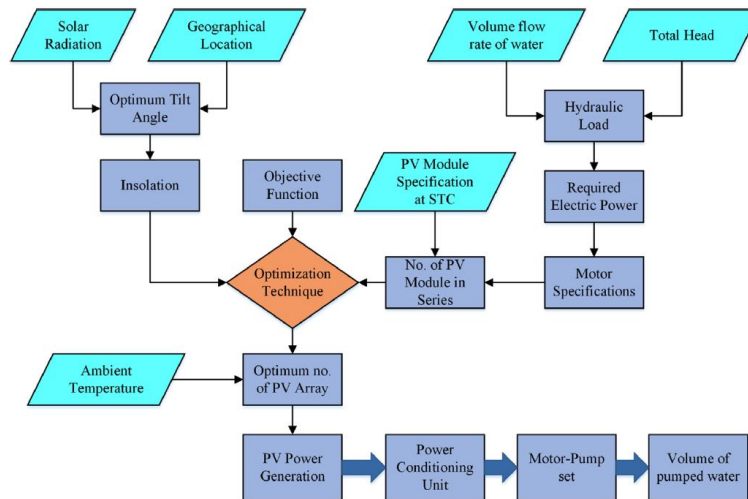
Meteorologiset ilmiöt ovat suurimmat vaikuttavat tekijät aurinkovoimajärjestelmän tuottaman energian määrään. Alueellisten meteorologisten ilmiöiden takia aurinkosähköjärjestelmän mitoitus on sidottu alueellisesti. Sen vuoksi on tärkeää, että meteorologinen aineisto on tarpeeksi luotettavaa ja oikealta alueelta. Yksi suurimmista haasteista aurinkosähköjärjestelmän mitoittamisessa Muhsenin, Khatibin ja Naginin (2017) mukaan on se, että mitoittamisen aikana ei ole mahdollisuutta saada tarpeeksi pitkältä aikaväliltä meteorologisia aineistoja. (Muhsen;Khatib;& Nagi, 2017)

Glasnovic ja Margeta (2007) nostivat tutkimuksessaan esiin ongelmia, jotka he näkivät haasteellisiksi aurinkosähköjärjestelmän mitoittamisessa pumppaukseen. Heidän mukaansa laskelmissa jätetään usein huomioimatta mahdolliset muutokset vedenpinnan korkeuden osalta. Pinnankorkeus voi vaihdella eri vuodenaikoina. Vedenpinnan korkeuden muutos vaikuttaa pumppauksessa käytettävän energian määrään ja tarvittavaan tehoon. Lisäksi heidän mukaansa järjestelmän mitoittamisessa keskitytään liikaa yhteen kuukauteen. Heidän mukaansa mitoittamisessa jätetään liian vähälle huomiolle järjestelmän energiantuoton riittävyys veden pumppaukseen muina kuin kriittisenä kuukautena. (Glasnovic & Margeta, 2007)

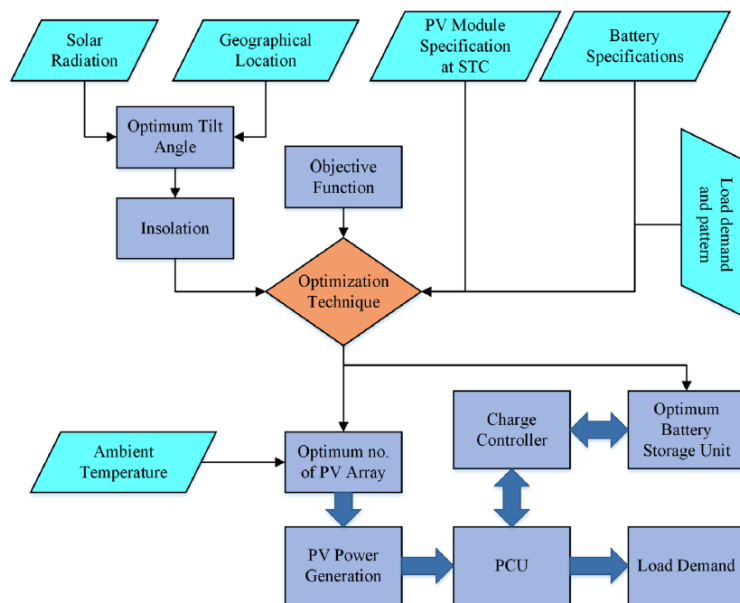
Aikaisempien menetelmien ongelma on noussut konkreettisesti esiin esimerkiksi maanviljelyssä. Maanviljelyssä on havaittu, että aurinkoenergiaa ei ole aina saatavissa silloin, kun vettä pitää pumpata. Keskiarvolla toteutettavat laskentatavat eivät ota tätä huomioon. Sen vuoksi yleisillä aurinkosähköjärjestelmien mitoittamismenetelmillä ei kyetä laskemaan optimaalista järjestelmää veden pumppaukseen. Menetelmien ongelma on, että järjestelmien mitoittamisessa käytetään keskiarvoja niin aurinkoenergian saannin, kuin pumppaustarpeen osalta. (Glasnovic & Margeta, 2007)

### 2.2.1 Aurinkosähköjärjestelmän mitoitus

Järjestelmän tuottama energia ja sen tehokkuus riippuvat monesta eri tekijästä, kuten esimerkiksi järjestelmän sijoituspaikan sääoloista. Optimaalisen aurinkosähköjärjestelmän mitoituksessa käytetäänkin optimoitavasta järjestelmästä riippuen järjestelmään sopivia taloudellisia ja ympäristöllisiä parametrejä, yhtälöitä ja teknisiä tietoja. Järjestelmien optimointiprosessi akuttomalle aurinkosähköjärjestelmälle on kuvattu kuvassa 2.1 ja akulliselle järjestelmälle kuvassa 2.2. Optimointiprosessissa optimaalinen järjestelmä määritetään järjestelmälle asetetun tavoitteen, säteilymäärän ja järjestelmävaatimusten avulla. Akuttomassa järjestelmässä prosessi on suoraviivaisempi kuin akullisessa järjestelmässä. (Rawat;Kaushik;& Lamba, 2016)



**Kuva 2.1.** Prosessi akuttoman aurinkosähköjärjestelmän valinnalle. (Rawat;Kaushik; & Lamba, 2016)

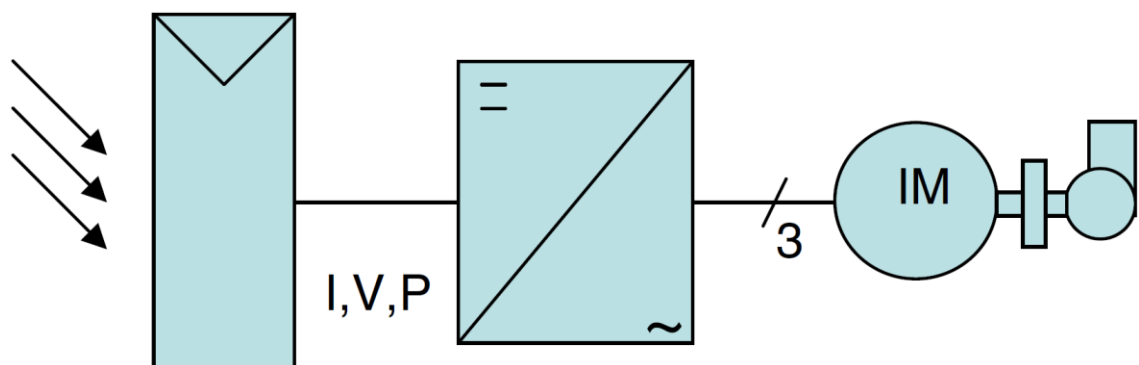


**Kuva 2.2.** Prosessi akustollisen aurinkosähköjärjestelmän valinnalle. (Rawat;Kaushik; & Lamba, 2016)

Kuvista 2.1 ja 2.2 nähdään, että optimisointimenetelmä on tärkeässä osassa optimaalisen järjestelmän löytämiseksi. Tutkimuksissa aurinkosähköjärjestelmän optimaalisen koon mitoittamiseen on käytetty eri menetelmiä. Menetelmät on jaettu kolmeen kategoriaan; intuitiiviseen, analyyttiseen ja numeeriseen. Kirjallisuudessa menetelmien käyttö jakaantuu 31%, 23% ja 46%. (Muhsen;Khatib; & Nagi, 2017). Näiden kolmen menetelmän lisäksi on vielä menetelmiä, joissa optimaalisen järjestelmän mitoittamisessa hyödynnetään tekoälyä (Rawat;Kaushik; & Lamba, 2016).

Intuitiivinen menetelmä on optimointimenetelmistä yksinkertaisin ja epätarkin. Menetelmä perustuu aurinkosähköjärjestelmän mitoittamisesta joko huonoimman tai keskiarvoisen kuukauden säteilymäärän perusteella (Muhsen;Khatib;& Nagi, 2017). Menetelmää käytettäessä usein yliarvioidaan aurinkosähköjärjestelmän koko ja energiavarastot (Rawat;Kaushik;& Lamba, 2016). Menetelmää on hyödynnetty esimerkiksi Ebaidin, Qandilin ja Hammadin (2013) tekemässä tutkimuksessa, jossa luotiin yhtenäistä lähestymistapaa aurinkosähköjärjestelmien mitoittamiseen. Tutkimuksessa järjestelmä mitoitettiin siten, että sen kapasiteetti riittää varmasti tarpeeseen. Aurinkosähköjärjestelmän energiantuoton luotettavuus oli tärkein kriteeri järjestelmän suunnittelussa, minkä vuoksi järjestelmä oli mahdollista ylimitoittaa (Ebaid;Qandil;& Hammad, 2013). Tämän vuoksi tutkimuksessa käytettiin intuitiivista menetelmää.

Intuitiivisissa menetelmissä aurinkosähköjärjestelmän mitoittamisessa ei pyritä mitoittamaan järjestelmää kustannustehokkaasti, vaan järjestelmän mitoittamisen tärkein painoarvo on järjestelmän energiantuoton luotettavuudessa. Toisin kuin intuitiivinen menetelmässä, analyttisessä menetelmässä pyritään löytämään luotettava ja/tai kustannustehokas aurinkosähköjärjestelmä. Menetelmässä luodaan matemaattinen malli aurinkosähköjärjestelmään kuuluvien komponenttien pohjalta ja järjestelmän toimintaa tarkastetaan viikko tai kuukausitasolla (Rawat;Kaushik;& Lamba, 2016). Menetelmää on hyödynnetty muun muassa Martiren, Glaizen, Joubertin ja Rouvieren (2008) tekemässä tutkimuksessa, jossa analyttistä menetelmää hyödynnettiin aurinkosähköjärjestelmän mitoittamisessa. Kuvassa 2.3 on esitetty järjestelmä, jolle he mitoittivat optimaalista akutonta aurinkosähköjärjestelmää eri tilanteissa. Järjestelmään kuului kennosto, järjestelmän omat komponentit ja pumppu. (Martire;Glaize;Joubert;& Rouviere, 2008)



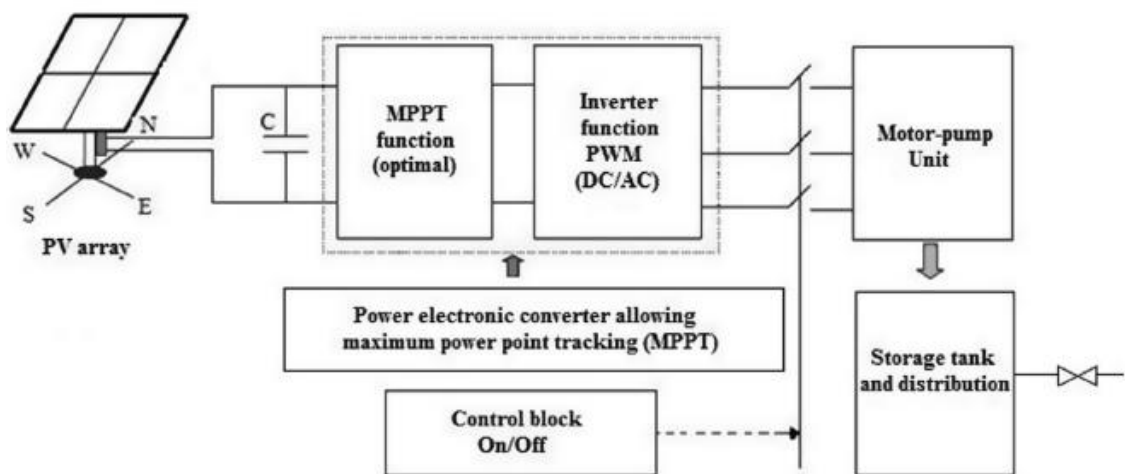
**Kuva 2.3.** Martiren, Glaizen, Joubertin ja Rouvieren mallintama järjestelmä. (Martire;Glaize;Joubert;& Rouviere, 2008)

Kuvassa esitetty järjestelmä simuloitiin komponenttien perusteella muodostetulla laskentamallilla. Tutkimuksessa laskentamalli koostettiin sähköisten komponenttien ominaisuuksista, pumppauslaista ja affiniteetilaista, jonka jälkeen laskentamallit yhdistettiin yhdeksi kokonaisuudeksi. Mallin avulla simuloitiin järjestelmän toimintaa. Tutkimukseenaan Martire, Glaize, Jouberti ja Rouviere (2008) havaitsivat sen, että heidän kehittämäänsä simulaatiosta saadut tulokset vastasivat hyvin todellista toimintaa. Simulaation ja

todellisen toiminnan välillä oli havaittavissa pieniä eroavaisuuksia, mutta nämä olivat virherajojen sisällä. He totesivat sen, että kyseistä menetelmää on mahdollista käyttää aurinkosähköjärjestelmän optimointiin. (Martire;Glaize;Joubert;& Rouviere, 2008)

Numeraalisissa menetelmissä mennään astetta pidemmälle kuin analyttisissä menetelmissä. Numeraalisissa menetelmissä järjestelmä mallinnetaan kuten analyttisessä menetelmässä, mutta laskenta tapahtuu pienemmällä aikavälillä. Laskut suoritetaan usein tunnin välein, mutta ne ovat myös mahdollista suorittaa tätä pienemmällä aikavälillä. Menetelmä vaatii enemmän dataa ja laskentatehoa kuin analyttinen menetelmä, mutta sen avulla on mahdollista löytää parempi järjestelmäratkaisu. (Rawat;Kaushik;& Lamba, 2016).

Bouzidi (2013) käytti numeerista menetelmää aurinkosähköjärjestelmän mitoittamiseen veden pumppauksessa. Menetelmää hyödyntämällä pyrittiin laatimaan uusi menetelmä optimaalisen aurinkosähköjärjestelmän mitoittamiseen pumppausjärjestelmässä. Mitoitettavalta pumppausjärjestelmästä vaadittiin 45 metrin nostokorkeutta ja 60 kuution päivätuotolla. Kuvassa 2.4 on esitetty järjestelmä ja sen komponentit (kennosto, invertteri, säätö, pumppu ja vesisäiliö), jotka Bouzidi mallinsi tutkimuksessaan (Bouzidi, 2013).

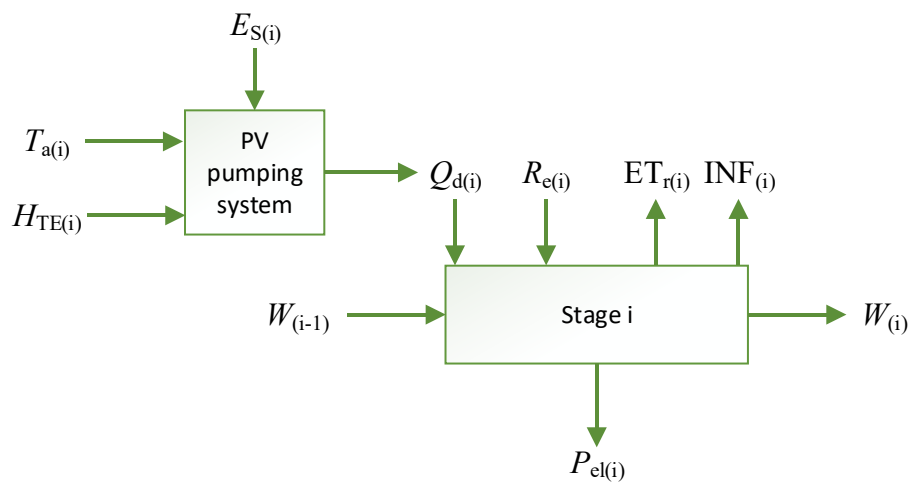


**Kuva 2.4.** Bouzidin mallintama aurinkosähköjärjestelmä. (Bouzidi, 2013)

Bouzidin (2013) yhteenveto aurinkojärjestelmän mitoittamisen luotettavuudesta tutkimuksen jälkeen oli seuraava. Optimoitaessa aurinkosähköjärjestelmää mahdollisimman pieneksi heikennetään samanaikaisesti järjestelmän toiminnan luotettavuutta. Säilytystankkien koko on tärkeä tekijä järjestelmän suunnittelussa. Säilytystankkien koolla ja kennostojen koolla on selkeä yhteys järjestelmän luotettavuuden osalta. Kennoston koko on käänteisessä suhteessa aurinkosähköjärjestelmän energian varastointikokoon. Pienemmillä energianvarastointimahdollisuuksilla vettä pitää pumpata suuremmalla virtaamalla, jotta päästään samaan järjestelmän luotettavuuteen kuin suuremmilla varastointimahdollisuuksilla. (Bouzidi, 2013)



Numeerista menetelmää aurinkosähköjärjestelmän mitoittamiseen on hyödynnetty myös Glasnovic ja Margeta (2007) tekemässä tutkimuksessa, jossa aurinkosähköjärjestelmää mitoittettiin maanviljelyn vesien pumppaukseen. Tutkimuksessa luotiin matemaattinen malli aurinkosähköjärjestelmästä, jonka avulla määritettiin optimaalinen järjestelmä. Heidän luomansa matemaattinen malli on esitetty kuvassa 2.5, joka ottaa huomioon aurinkosähköjärjestelmään ja pumppaukseen vaikuttavat tekijät. Mallissa pumpattavan veden määrä  $Q_{d(i)}$  tarkastetaan tarkasteluajanvälin Stage i aikana. Muuttumattomat tekijät matemaattisissa mallissa ovat kasteltavan alueen määrä  $W_{(i)}$  ja muuttujia veden sakeisuus  $R_{e(i)}$ , haihdunta  $ET_{r(i)}$  ja veden suodattuminen  $INF_{(i)}$ . Aurinkojärjestelmän toimintaan vaikuttavat tekijät ovat auringon säteilyn määrä  $E_{S(i)}$ , ympäristön lämpötila  $T_{a(i)}$  ja kokonaisnostokorkeus  $H_{TE(i)}$ . (Muhsen;Khatib;& Nagi, 2017)



**Kuva 2.5.** Matemaattinen malli optimaalisen aurinkosähköjärjestelmän laskentaan. (muokattu lähteestä Muhsen;Khatib;& Nagi, 2017)

Tutkimuksen aikana tehtyjen havaintojen perusteella todettiin, että aikaisempien menetelmien perusteella tehtävät mitoittamiset eivät ole optimaalisia, kun järjestelmän käyttötarkoituksena on vesien pumppaus. Glasnovic ja Margeta mukaan aikaisemmat menetelmät ovat epäsystemaattisia ja muuttumattomia. Kun järjestelmän mitoittamiseen käytettiin numeerista menetelmää, kyettiin mitoittamaan aikaisempaa pienempi järjestelmä. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin, että matemaattisen malliin pitää määrällisesti saada riittävän laadukasta ja luotettavaa dataa. (Glasnovic & Margeta, 2007)

Rawat, Kaushik ja Lamba (2016) tekemässä tutkimuksessa analysoitiin eri optimointimenetelmiä aurinkosähköjärjestelmän mitoittamiseen. Tutkimuksessa he listaavat suurimmat vaikuttavat tekijät aurinkosähköjärjestelmän mitoittamisessa. Niitä ovat pumpun vääntö, kuormanhallinta ja invertterin hyötysuhde. Heidän mielestään on suositeltavaa käyttää tekoälyä optimaalisen järjestelmän löytämiseen, jos optimoinnissa on mahdollista hyödyntää suuria datamääriä. Jos tämä ei ole mahdollista, numeraalinen menetelmä on paras menetelmä optimaalisen aurinkosähköjärjestelmän löytämiseen. (Rawat;Kaushik;& Lamba, 2016)

Intuiitiivisilla, numeerisilla ja analyttisillä menetelmillä on niin hyvät kuin huonot puolensa. Intuiitiivisissa menetelmissä aurinkosähköjärjestelmän mitoittaminen on yksinkertaista ja nopeaa, mutta menetelmä ei sovellu aurinkosähköjärjestelmän kustannustehokkaaseen optimointiin. Analyttisillä menetelmillä tähän kyetään, mutta ei niin tarkasti kuin numeraalisilla menetelmillä. Jos kuormituksesta ei ole saatavilla dataa, analyttiset menetelmät soveltuvat paremmin järjestelmän kustannustehokkaaseen optimointiin. Jos aineistoa on saatavilla, numeraaliset menetelmät soveltuvat parhaiten optimaalisen aurinkosähköjärjestelmän määrittämiseen.

### 2.2.2 Aurinkosähköjärjestelmän investointilaskelmat

Aurinkosähköjärjestelmän kannattavuus riippuu monesta tekijästä. Näiden arviointiin käytetään useita eri menetelmiä. Arvioinnissa voidaan painottua puhtaasti taloudelliseen kannattavuuteen ja/tai eettisiin arvoihin, jotka järjestelmä sisältää. Taloudellinen kannattavuus muodostuu suurimmaksi osin energiasta, joka päätyy hyötykäyttöön (Purohit, 2007). Jos investointia tarkastetaan eettisesti, aurinkosähköjärjestelmän arvoa voidaan tarkastaa kahdella eri tapaa, kansantaloudellisilla ja luonnon arvoilla (Menegaki, 2008).

Kun investointia tarkastetaan kansantaloudellisilla arvoilla, aurinkosähköjärjestelmän arvo investoinnille muodostuu siitä, että järjestelmä tuottaa energiaa, fossiilisen polttoaineen käyttö pienenee ja järjestelmä tuottaa vaihtoehdosta muodostuvan arvon investoijalle. Järjestelmä tuottaa arvoa myös muille tuottamalla lupausarvon siitä, että tulevat sukupolvet tulevat nauttimaan puhtaammasta ilmasta aurinkosähköjärjestelmän ansiosta. Kun investointia tarkastetaan luonnon arvoilla, investointi järjestelmään pitää fossiiliset polttoaineet ennallaan. Näiden arvottaminen rahalliseen arvoon on haastavaa ja aiheesta on jatkuvaa keskustelua siitä, että ovatko kannattavuuslaskelmat, jotka eivät huomioi eettisiä arvoja, epätäydellisiä tai harhaanjohtavia. (Menegaki, 2008)

Riippumatta siitä, huomioidaanko eettiset arvot kannattavuuslaskelmissa, investoinnin kannattavuuden arvioinnissa noudatetaan usein kahdeksanvaiheista prosessia: 1.) projektin määrittäminen, 2.) projektin vaikutusten arviointi, 3.) taloudellisesti merkittävien tekijöiden tunnistaminen, 4.) taloudellisesti merkittävien tekijöiden määrällinen arviointi, 5.) taloudellisesti merkittävien tekijöiden rahallisen arvon määrittäminen, 6.) kustannus- ja hyötyanalyysien diskonttaus, 7.) nykyarvomenetelmän soveltaminen ja 8.) herkkyyshanalyysin tekeminen. Järjestelmän kustannuksen arviointi tapahtuu vaiheessa viisi ja esitetty prosessi kokonaisuudessa kuvaillaan kustannusten ja hyödyn väliseksi analyysiksi. (Menegaki, 2008)

Merkittävin taloudellinen tekijä aurinkosähköjärjestelmässä on sen tuottama energia. Järjestelmän tuottama energia vähentää suoraan aggregaatin käyttämää polttoaineen määrää tilanteessa, jossa aurinkosähköjärjestelmällä pumpataan vettä aggregaattijärjestelmän sijasta. Tässä tilanteessa järjestelmän tuottaman rahallinen hyöty voidaan arvioida kaavalla

1. Kaavassa sulkeissa oleva kohta muodostaa polttoaineen määrän, joka aurinkosähköjärjestelmällä kyetään vähentämään. (Purohit, 2007)

$$MW_{ds} = \left[ \frac{AUE}{CV_d \cdot \eta_{p,dep}} \right] p_d , \quad (1)$$

jossa  $MW_{ds}$  on dieselin käytön vähentymisen rahallinen arvo,  $AUE$  on käytetyn energian määrä,  $CV_d$  on dieselin lämpöarvo,  $\eta_{p,dep}$  on aggregaatin hyötysuhde ja  $p_d$  on dieselin hinta litraa kohden.

Nykyarvonmenetelmä on yksi käytetyimmistä menetelmistä arvioimaan investointien kannattavuutta. Menetelmässä nettotulot ja investoinnin jäännösarvo diskontataan valitulla laskentakorolla hankintahetkeen. Tällöin saadaan tietää investoinnin tuottamien nettotulojen rahallinen arvo investoinnin alkuhetkellä. Tämän avulla voidaan arvioida investoinnin kannattavuutta (Betnner, 2014). Jos nykyarvomenetelmällä saatu arvo on pienempi kuin investoinnin kokonaissuus, investointi olisi tappiollinen. Vastaavasti, jos arvo olisi suurempi, investointi järjestelmään on kannattavaa (Gallo, 2014). Kaavassa 2 on esitetty Purohitin (2007) esittämä nykyarvomenetelmä investoinnin kannattavuuden määrittämiseen aurinkosähköjärjestelmälle, jolla korvataan dieselaggregaatilla toteutettava veden pumppaus (Purohit, 2007).

$$NPV_d = \left[ (MW_{ds} \cdot C_i) \left\{ \frac{(1+d)^{t_a}-1}{d(1+i)^t} \right\} \right] p_d , \quad (2)$$

jossa  $NPV_d$  on dieselin käytön vähentymisen rahallinen arvo nykyajassa,  $MW_{ds}$  on dieselin käytön vähentymisen rahallinen arvo,  $C_i$  on vuosittainen korjaus,  $i$  on käytettävä laskentakorko ja  $t_a$  on aurinkosähköjärjestelmän käyttöikä.

Purohitin (2007) esittämä menetelmä ottaa huomioon vain säästettävän polttoaineen määrän ja muuntaa sen vastaamaan nykyarvoa. Järjestelmä kykenee tuottamaan säästöjä myös muualla kuin pelkästään polttoaineen vähentymisessä. Näitä ovat esimerkiksi pienentyneet huoltokustannukset. Jos investoinnin kannattavuuden arvioinnissa halutaan huomioida myös nämä tekijät, investoinnin muodostamien säästöjen muuttamisessa nykyarvoon voidaan hyödyntää kaavaa 3.

$$NVP = \sum_{t=1}^n \frac{s_t}{(1+i)^t} + \frac{JA}{(1+i)^n} - HA , \quad (3)$$

jossa  $NVP$  on investoinnin nykyarvo,  $s_t$  on investoinnin synnyttämät nettotuotot vuonna  $t$ ,  $JA$  on investoinnin jäännösarvo pitoajan  $n$  lopussa,  $i$  on käytetty laskentakorko ja  $HA$  alkuinvestointi.

### 2.3 Turvetuotannon vesien vedenlaatu

Virtaaman vaikutusta vedenlaatuun on tutkittu useilla eri toimialueilla. Kurekin ja Ostfeldin (2014) tekemässä tutkimuksessa tutkittiin kompromissia pumppauskustannusten ja

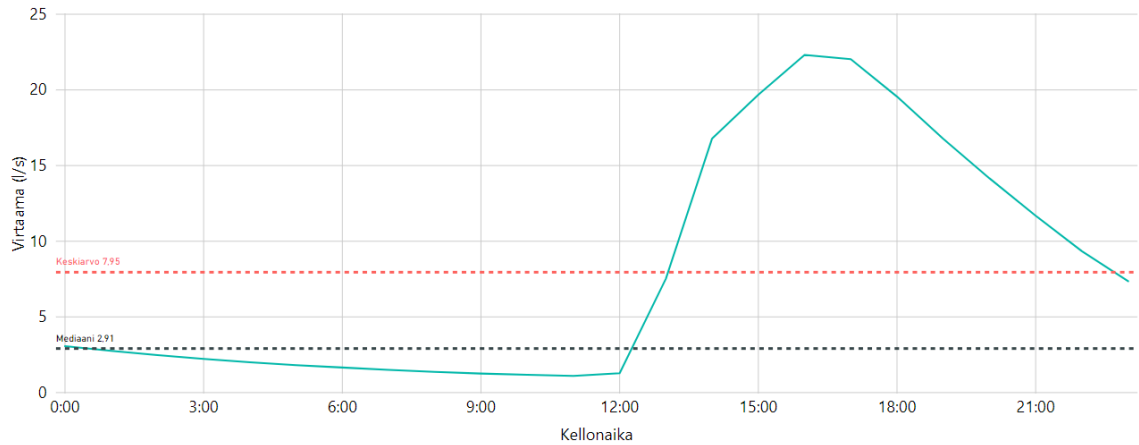
vedenlaadun välillä vedenjakelujärjestelmissä. Tutkimuksessa luotiin menetelmä päätöksenteon tueksi juomaveden vedenjakelun toiminnan suunnitteluun. Tutkimuksessa todettiin, että suhde pumppaukseen käytetyn energia ja vedenlaadun osalta käyttäytyi seuraavan oletuksen mukaisesti: mitä enemmän energiaa käytettiin pumppaukseen, sitä suuremman virtaaman pumppaus tuotti vedenjakelujärjestelmässä. Suuremman virtaaman myötä vedenlaatu vedenjakelujärjestelmässä parani. (Kurek & Ostfeld, 2014)

Vedenlaatututkimuksissa, jotka on toteutettu turvetuotannon vesienkäsittelyssä, ei ole kyetty yhdistämään vedenlaadun ja virtaaman välistä suhdetta. Viimeisin tutkimus aiheesta on Sillanpään (2016) Pro Gradu, jossa tutkittiin virtaaman vaikutusta turvetuotantoalueen pintavalutuskentän toimintaan. Tutkimuksessa tutkittiin 36 eri turvetuotantoalueen päästötarkkailuja vuosilta 2008-2013. Tutkimuksessa keskityttiin neljään keskeiseen vedenlaadun kuvaajaan, jotka olivat vedestä mitattava fosfori, typpi, kiintoaine ja happea kuluttava orgaaninen aine. Tutkimuksen ennakko-oletus oli, että vedenlaatu ja vesienkäsittelyrakenteiden puhdistusteho heikkenevät suurten virtaamien myötä. (Sillanpää, 2016)

Aineisto, jota tutkimuksessa käytettiin, kerättiin turvetuotantoalueiden pintavalutuskenttien mittapatojen virtaamamittareilta, jotka mittaavat pintavalutuskentältä lähtevän veden virtausnopeutta. Virtausnopeudet muutettiin turvetuotantoalueen pinta-alan perusteella valumaksi, joka kuvastaa virtausta hehtaaria kohden. Vedenlaatu saatiin vesinäytteiden muodossa, jotka haettiin turvetuotantoalueilta noin 20 kertaa vuodessa. Näiden pohjalta laskettiin reduktio, joka kuvastaa pintavalutuskentän toimintaa. Aineiston käsittelyssä saatuja ainepitoisuuksia verrattiin vedenlaatunäytteenottopäivän keskimääräiseen valumaan. (Sillanpää, 2016)

Pro Gradun tutkimustuloksena todettiin, että valuman lisääntyessä kiintoaineen keskimääräisessä puhdistustehossa ei tapahtunut muutosta vesienkäsittelyrakenteilla. Fosforin, typen ja orgaanisen aineen pitoisuudet olivat suurimmat pienten valumien aikaan. Näiden osalta kuormitus kasvoi valuman kasvaessa. Tutkimuksen perusteella valuman vaikutus erityisesti lähtevän veden laatuun on vähäinen. (Sillanpää, 2016)

Pumppaustarve ei oletettavasti muutu järjestelmän myötä, koska se muodostuu turvetuotantokentän kuivatusvesistä ja sateista. Joten, jos vuorokauden pitää pumpata tietty määrä vettä ja tarkastelu toteutetaan keskiarvovirtaaman kautta, se ei ota huomioon sitä, milloin ja kuinka suurella virtaamalla vesi pumpataan pintavalutuskentälle. Tästä esimerkkinä toimii kuva 2.6, jossa on esitetty 12. maaliskuuta 2016 mitattu pintavalutuskentältä lähtevä virtaama Joutsuon turvetuotantoalueelta. Kuvassa punaisella värillä on merkitty vuorokauden keskiarvovirtaama (7.95 l/s) ja mustalla virtaaman mediaani (2.91 l/s).



**Kuva 2.6.** Virtaamapiikit mittapadon virtaamassa Joutsuolla 12.03.2016.

Kuvaajasta voidaan nähdä, että Joutsuon turvetuotantoalueen pumppaamon pumppu käyttäytyy on/off -periaatteella. Koska pumppu on mitoitettu tulvatilanteiden mukaisesti, se kykenee tyhjentämään pumppualtaan tyhjäksi lyhyessä ajassa. Aikaisemmat tutkimukset turvetuotannon vedenlaadun osalta on toteutettu tämänkaltaisessa pumppaamoratkaisussa. Aurinkosähköjärjestelmän myötä tulevan pienen pumpun lisäys pumppaamolle muuttaa veden pumppauksen on/off -tyyppisestä hetkellisestä pumppauksesta jatkuvaan pumppaukseen.

Kyseinen muutos ei pienennä pumppaamolla pumpattavan veden määrää, joten järjestelmäsennuksen ei pitäisi vaikuttaa mitattaviin keskiarvovirtaamiin. Pumppaustavan muutos ilmeni hajonnan pientymisenä, koska keskiarvovirtaama on riippuvainen pumppaustarpeesta. Aikaisemmissa tutkimuksissa ei ole otettu huomioon sitä, vaikuttaako tämänkaltaisen muutos pintavalutuskentän vedenkäsittelyyn ja sen myötä vedenlaatuun.

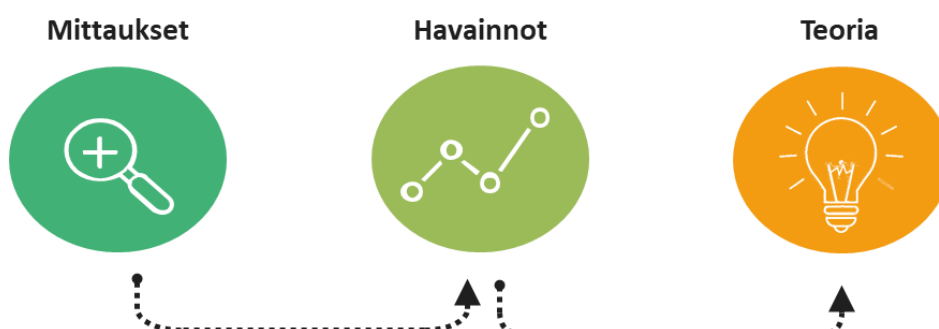
### 3. TUTKIMUSMENETELMÄT JA -AINEISTO

Tutkimus jakaantuu kahteen eri kokonaisuuteen; tutkimuksiin pumppaustavan vaikutuksesta lähtevän veden laatuun ja aurinkosähköjärjestelmän kannattavuudesta. Näitä kokonaisuuksia tarkasteltiin erillään toisistaan. Tässä luvussa esitetään tutkimuksessa käytettyjä tutkimusmenetelmiä näiden kahden kokonaisuuden osalta. Tutkimuksen lopussa eri kokonaisuuksista muodostetut johtopäätökset yhdistetään ja muodostetaan lopullinen päätelmä siitä, onko aurinkojärjestelmän soveltuva turvetuotannon vesien pumppauksen energianlähteeksi.

#### 3.1 Pumppaustavan vaikutus lähtevän veden laatuun

Tutkimuskatsauksessa ilmeni, että keskiarvon perusteella tehtyjä tutkimuksia vedenlaadun osalta on tehty sekä vedenjakelujärjestelmissä että turvetuotannossa. Alustavan hypoteesin perusteella on oletus siitä, että pumppaustavan muutos on/off -tyyppisestä jatkuvaan pumppaukseen ei vaikuta keskiarvovirtaamaan vaan virtaaman hajontaan. Tutkimusta, jossa vedenlaatua olisi tarkasteltu virtaaman hajonnan kautta, ei ole toteutettu turvetuotannossa.

Lähdekirjallisuuden puutteen vuoksi vedenlaatu puolen tutkimuksessa käytettiin induktiivisia tutkimusmetodeja. Tavoitteena oli pyrkiä havaitsemaan muutoksia ennen ja jälkeen järjestelmän asennusta. Havaittujen muutosten pohjalta muodostettiin teoria pumppauksen vaikutuksesta pintavalutus kentältä lähtevän veden laatuun. Kuvassa 3.1 on esitetty yksinkertaistettu tutkimusprosessi pumppauksen vaikutuksesta lähtevän veden laatuun.



**Kuva 3.1.** Tutkimusprosessi pumppauksen vaikutuksesta vedenlaatuun.

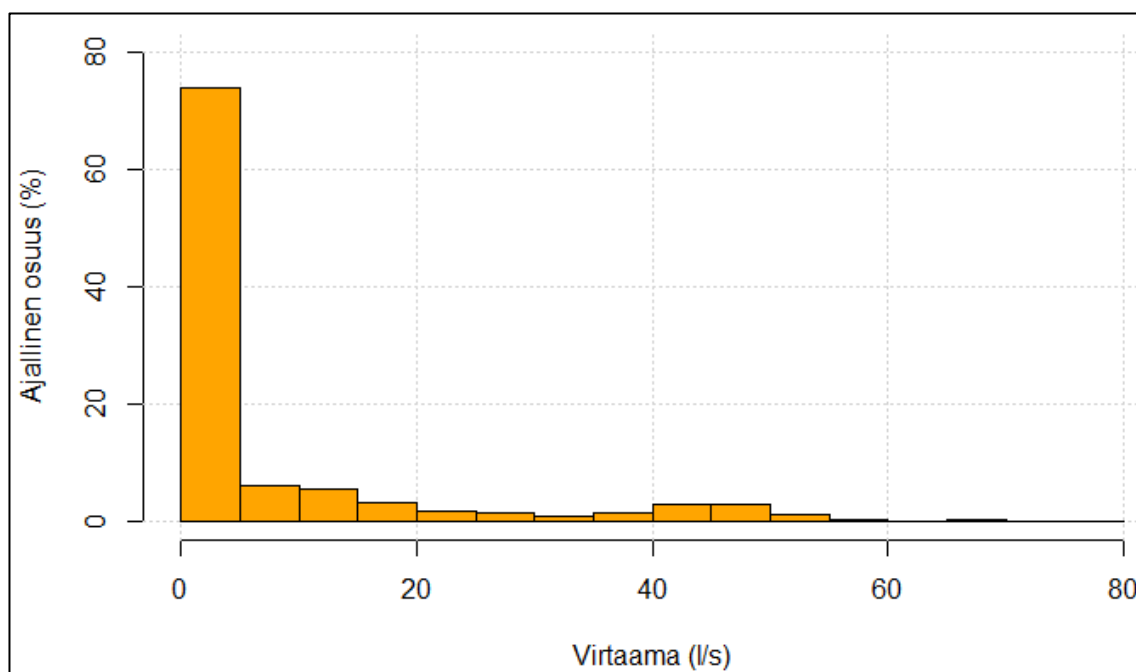
##### 3.1.1 Lähtevän veden virtaus

Pumppaustavan muutoksen vaikutus lähtevän veden virtaamassa perustui kahteen eri osaan; keskiarvovirtaaman ja virtaaman hajonnan tutkimiseen. Keskiarvovirtaaman osalta hypoteesi oli, että pumppaustavan muutos on/off -tyyppisestä pumppauksesta jat-

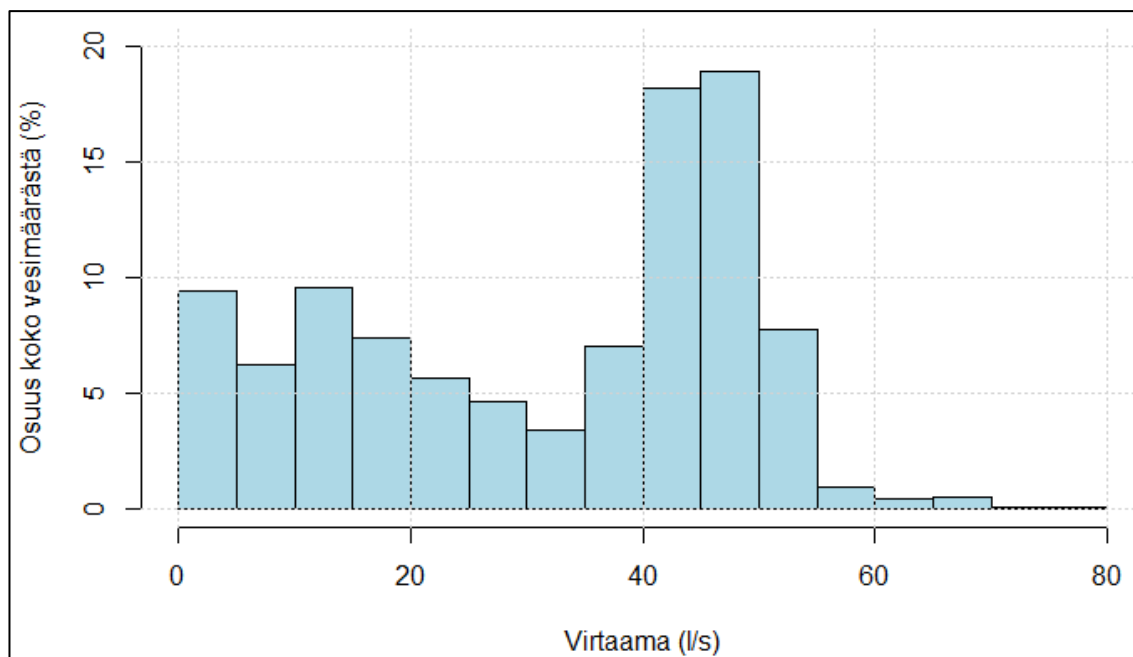
kuvaan pumppaukseen ei muuta keskiarvoa, koska järjestelmämuutos ei vaikuta pumpattavan veden määrään ja eroavaisuudet pintavalutuskentän haihdunnassa tapahtuvien muutosten osalta oletetaan minimaalisiksi.

Lähtevän veden virtaamaprofiilin muutosten etsiminen toteutettiin sekä visuaalisen analysoinnin, että tilastomenetelmien keinoin. Visuaalisessa analysoinnissa etsittiin muutoksia pintavalutuskentältä lähtevän veden virtaamassa järjestelmän asennuksen jälkeen. Tämän vuoksi aineiston pohjalta muodostettiin kolme eri kuvaajaa. Kuvaajat havainnollistavat lähtevän veden virtaaman jakaumassa tapahtuvat muutokset visuaalisen analysoinnin kautta

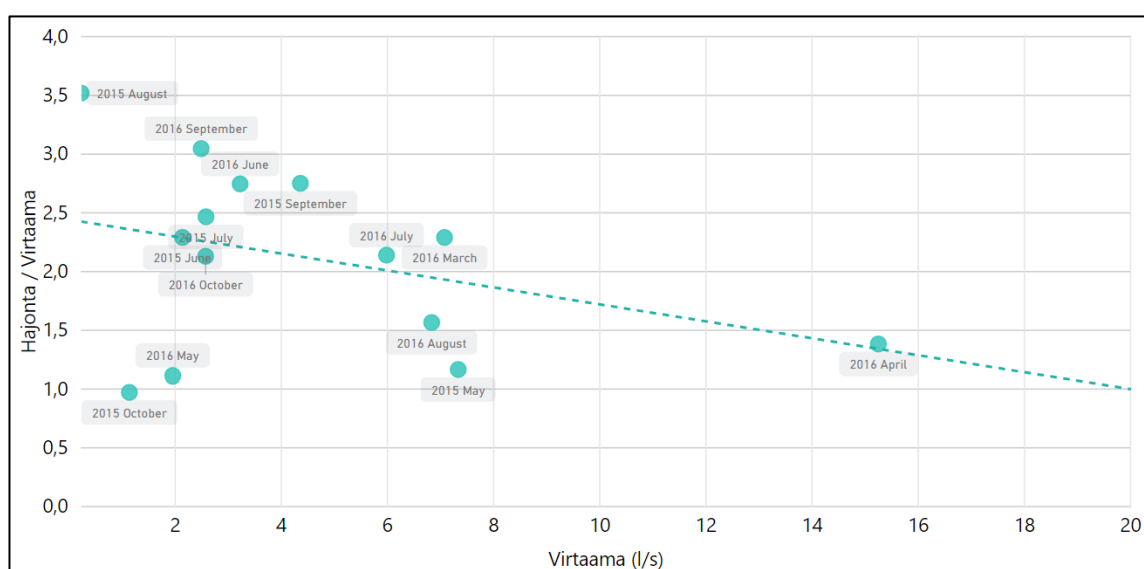
Ensimmäisenä kuvaajana muodostettiin kuvaaja lähtevän veden virtaaman ajallisesta jakaantumisesta eri virtausalueille. Kuvassa 3.2 on esitetty kyseinen kuvaaja, joka on muodostettu Hirvinevan kohteen virtaama-aineistosta. Seuraavassa kuvaajassa 3.3, tarkasteltiin pintavalutuskentältä lähtevän vesimäärän jakaantumista eri virtausalueille. Tutkimuksessa tätä kutsutaan virtaamaprofiiliksi. Viimeisenä menetelmänä käytettiin kuvaajaa, joka kuvastaa kuukauden keskiarvovirtaaman ja hajonnan välistä suhdetta. Tämä on esitetty kuvaajassa 3.4.



**Kuva 3.2.** Lähtevän veden virtauksen ajallinen osuus eri virtausalueilla.



**Kuva 3.3.** Lähtevän veden vesimäärän jakaantuminen eri virtausalueille.



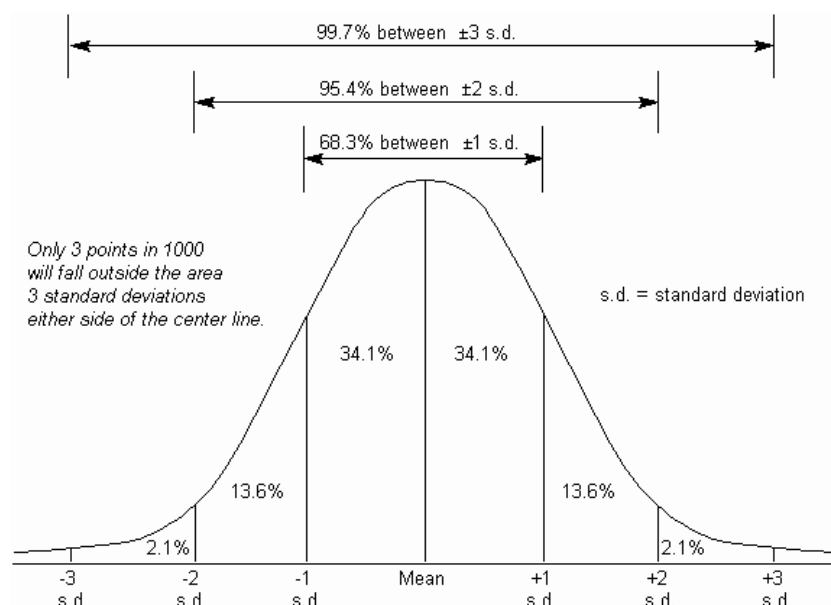
**Kuva 3.4.** Virtaamien hajontojen suhdeluvut eri kuukausilta keskiarvovirtaamien funktiona.

Näiden kolmen kuvaajan kautta pyrittiin visuaalisen analysoinnin avulla havaitsemaan uuden järjestelmän myötä tulevat vaikutukset pintavalutuskentältä lähtevään virtaukseen. Alustavana hypoteesina järjestelmän tuomiin muutoksiin on, että järjestelmän myötä suurempi osuus pintavalutuskentältä poistuvasta vedestä tulee tapahtumaan pienemmillä virtausnopeuksilla.

Tilastoanalyysissä tarkkailtiin erityisesti virtaaman jakaumaa, joka kuvastaa sitä, kuinka tiheästi virtaaman arvoja esiintyy virtausalueen eri kohdissa. Yleisin jakauman muoto on



yleensä normaalijakauma, jossa satunnaisfunktiot ovat jakaantuneet odotusarvon ympärille tasaisesti. Normaalijakauma on esitetty kuvassa 3.5. Kuvaajassa esitetään eri satunnaismuuttujien arvoja ja kuinka tiheästi niitä esiintyy. (Encyclopaedia Britannica, 2018)



**Kuva 3.5.** Normaalijakauma. (Grant High School Mathematics, 2012)

Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään tilastoanalyysin keinoin se, ovatko eroavaisuudet ennen järjestelmän asennusta ja asennuksen jälkeen tilastollisesti merkitseviä. Tilastollisen menetelmän merkitsevyyden testaamiseen on useita eri menetelmiä, jotka voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan; parametrisiin ja ei-parametrisiin testeihin. Parametriset testit edellyttävät, että aineisto noudattaa normaalijakaumaa. Ei-parametriset testit eivät edellytä tätä. Jotta tilastoanalyysit suoritetaan oikealla tavalla, pitää selvittää se, noudattaako aineisto normaalijakaumaa. Se, että noudattaako aineisto normaalijakaumaa, voidaan todeta usealla eri menetelmällä. (Ghasemi & Zahediasl, 2012)

Kun kuvaa 3.2, jossa esitetään Hirvinevan lähtevän veden virtaamaprofiilia, verrataan kuvaan 3.5, jossa on esitetty esimerkki normaalijakaumasta, voidaan todeta, että virtaamaprofiili ei noudata normaalijakaumaa. Tämä johti siihen, että tilastollisiksi testeiksi valittiin ei-parametrisiä testejä kuten Mann-Whitney, Kruskal-Wallis ja Friedman testit. Kyseisillä testeillä on mahdollista määrittää, onko aineistojen keskiarvoissa havaittavat erot tilastollisesti merkitseviä. (Ghasemi & Zahediasl, 2012)

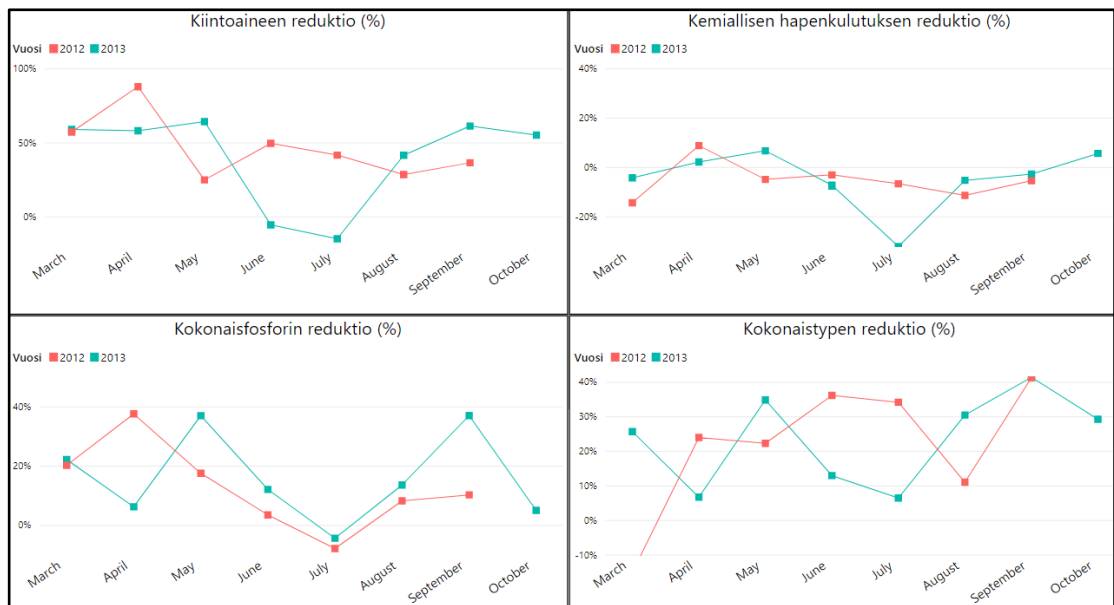
Aineistojen varianssien samankaltaisuuden testaamiseen käytetään usein kahta eri menetelmää, Fisherin F-testiä ja Leneven testiä. (Biostats, 2018). Virtaaman hajontamuutosten tilastollista merkitsevyyttä testattiin Levenen testillä, jolla määritettiin virtaaman varianssin eroavaisuutta. Levenen testin lisäksi keskiarvovirtaaman eroavaisuuden merkitsevyyttä ennen ja jälkeen järjestelmän muutosta testattiin riippumattoman otoksen testillä.

### 3.1.2 Vedenlaatu

Vedenlaadussa tapahtuvat muutokset tarkasteltiin myös visuaalisen analysoinnin keinoin, jossa pyrittiin havaitsemaan järjestelmien myötä ilmenneitä muutoksia. Ensisijaisesti tarkasteluissa keskityttiin pintavalutuskentällä tapahtuvan reduktion suuruuteen, koska pintavalutuskentän toimintaa tarkastetaan usein reduktioiden kautta. Se lasketaan pintavalutuskentälle tulevasta ja lähtevästä vedestä mitatuista arvoista, jotka kuvastavat kentän puhdistustulosta (Postila, ym., 2011). Kaavassa 4 on esitetty reduktion laskenta. Kuvassa 3.6 on esitetty kuvaajat, joiden avulla reduktioissa tapahtuvia muutoksia tarkasteltiin.

$$red. = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \cdot 100, \quad (4)$$

jossa  $red.$  on pitoisuusreduktio,  $C_{in}$  on tulevan veden pitoisuus, ja  $C_{out}$  on lähtevän veden pitoisuus.



**Kuva 3.6.** Reduktioissa tapahtuvat muutokset.

Jokaista muuttujaa tarkasteltiin myös erikseen kuvan 3.6 mukaisella menetelmällä. Jotta tarkastelu ei jäisi pelkästään visuaalisen analysoinnin tasolle, vedenlaatuosion tutkimuksessa käytettiin myös tilastoanalyysiä havaitsemaan mahdollisia muutoksia. Virtaama- ja vedenlaatumittausaineistot yhdistettiin vedenlaadun tilastoanalyysiä varten.

Aineiston yhdistämisen myötä päädyttiin käyttämään korrelaatioanalyysiä, jolla pyrittiin havaitsemaan mahdolliset korrelaatiot virtauksessa ja vedenlaadussa. Korrelaatio on tilastomenetelmissä käytettävä käsite, jolla kuvataan kahden muuttujan välistä riippuvuutta. Tavallisesti korrelaatiokertoimella tarkoitetaan Pearsonin korrelaatiota. Pearsonin korrelaatiokerroin lasketaan alla esitetyllä kaavalla. (Oja & Shevlyakov, 2016)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]^{\frac{1}{2}}}, \quad (5)$$

jossa  $r$  on korrelaatiokerroin,  $\bar{x}$  ja  $\bar{y}$  ovat otoskeskiarvoja, ja  $x_i$  ja  $y_i$  ovat otosarvoja.

Ennen tutkimuksen aloitusta muodostettiin mahdolliset hypoteesit tutkimukselle. Kyseiset hypoteesit on esitetty taulukossa 3.1, jossa huomioidaan virtaamaprofiilissa ja vedenlaadussa tapahtuvat muutokset. On kuitenkin huomioitava, että vaikka tutkimuksessa tutkitaan pumppauksen vaikutuksia vedenlaatuun, suoria johtopäätöksiä on hankala muodostaa, koska pintavalutuskentän toimintaan vaikuttaa monta eri tekijää. Kaikkia ulkopuolisia tekijöitä ei ole mahdollista sulkea tutkimuksen ulkopuolelle, mikä täytyy huomioida tutkimustulosten tarkastelun yhteydessä.

**Taulukko 3.1.** Hypoteesit vedenlaadun muutoksen osalta.

	<b>Virtaamaprofiili mittapadolla muuttuu</b>	<b>Virtaamaprofiili mittapadolla ei muutu</b>
<b>Muutos reduktiossa</b>	<i>Pumppaus oletettavasti vaikuttaa reduktioon.</i>	<i>Reduktio muuttuu ulkopuolisen tekijän johdosta.</i>
<b>Ei muutosta reduktiossa</b>	<i>Pumppaus ei vaikuta reduktioon.</i>	<i>Pumppaus ei vaikuta reduktioon.</i>

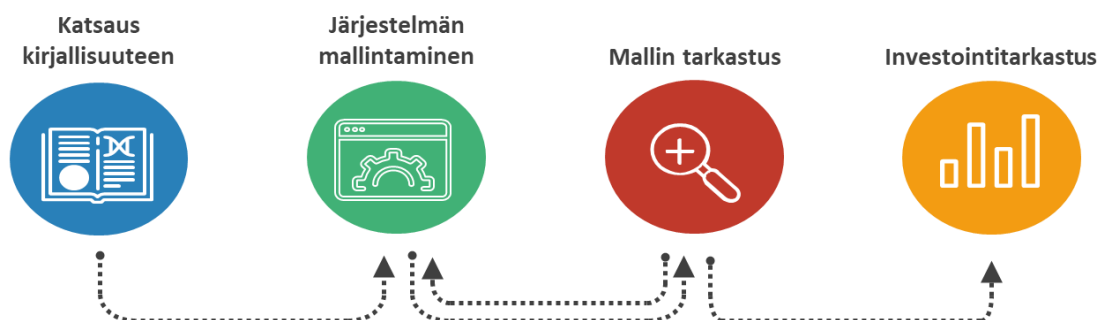
## 3.2 Aurinkosähköjärjestelmän kannattavuus

Aurinkosähköjärjestelmän kannattavuuden tutkinnassa määritetään aurinkovoimajärjestelmän kannattavuus turvetuotannon vesien pumppauksessa. Aurinkovoimajärjestelmällä tuotetaan energiaa pienelle pumpulle, joka vähentää pumppaamolla olevan suuren pumpun käyttöä. Investoinnin kannattavuus muodostuu suuren pumpun sähköistämiseen käytetyn dieselaggregaatin käytön vähentymisestä.

Yleensä polttoainesäästöt todetaan tutkimalla käytetyn polttoaineen määrää ennen järjestelmähankintaa ja tämän jälkeen sekä tutkitaan näistä nähtäviä eroavaisuuksia. Menetelmä sopii tilanteisiin, joissa kuormitus oletetaan samankaltaiseksi ennen ja jälkeen järjestelmähankintaa. Investoinnin kannattavuuspuolen arvioinnissa on myös yksi oleellinen ongelma. Käytetyn polttoaineen määrää ei ole kirjattu ylös suokohtaisesti, vaan alueellisesti, ja tämän myötä vertailua ei voida suorittaa käytetyn polttoaineen määrän perusteella. Toinen haaste on, että pumpputunteja ei kirjata ylös tietojärjestelmiin, vaan kyseiset tiedot on kirjattu pumppaamoilta löytyviin vihkoihin ja näitä ei kirjata ylös säännöllisesti. Pumppaustarve on myös riippuvainen monesta tekijästä, kuten esimerkiksi säästä. Näiden syiden vuoksi tutkimuksessa ei kyetty tekemään suoraa vertailua käytetyn polttoaineen määrästä ennen ja jälkeen järjestelmäasennusta.

Investointilaskelmissa pyrittiin myös määrittämään aurinkojärjestelmän kannattavuutta kaikkiin pumppaamoihin, joissa käytetään dieselaggregaattia. Tämän myötä parhaana ratkaisuna pidettiin aurinkosähköjärjestelmälle teoreettisen mallin luomista, jota sovelletaan investointipuolen laskentaan. Kyseisen menetelmän eduksi koettiin, että kyseistä mallia voidaan soveltaa kaikkiin turvetuotantoalueisiin ja järjestelmiä voidaan verrata keskenään ilman ulkopuolisten tekijöiden vaikutusta.

Tutkimusmenetelmäksi valikoitui realistinen tutkimusote, jossa käytetään tapaustutkimuksen menetelmiä. Kuvassa 3.7 on esitetty tutkimusprosessin vaiheet. Tutkimus jakaantui neljään pääkategoriaan; katsaus kirjallisuuteen, järjestelmän mallintaminen, mallin tarkastus ja investointitarkastus.



**Kuva 3.7.** Investoinnin kannattavuustutkimuksen eri vaiheet.

Kirjallisuuskatsauksessa perehdyttiin lähdekirjallisuuteen, joka auttoi muodostamaan ymmärryksen niistä tekijöistä, jotka vaikuttavat pumppaamon toimintaan. Näiden tekijöiden perusteella luotiin matemaattinen malli aurinkovoimajärjestelmälle, minkä jälkeen kyseistä mallia verrattiin koekohteisiin. Kun malli oli riittävän tarkka, sitä sovellettiin aurinkovoimajärjestelmän investoinnin kannattavuuden arviointiin. Investointitarkastelun perusteella luotiin johtopäätös järjestelmän kannattavuudesta nykyarvomenetelmän mukaisesti.

### 3.3 Käytettävät aineistot

Tutkimuksessa käytettiin useita eri aineistoja, jotka on esitetty taulukossa 3.2. Taulukossa mainitaan myös, mistä kyseiset aineistot on kerätty. Ensisijaisesti käytetty aineisto on hankittu Vapon tietojärjestelmistä, mutta tarpeeksi luotettava auringon säteilydata ladattiin Photovoltaic Geographical Information System -sivustolta. Se on Euroopan komission ylläpitämä julkinen sivusto, josta on mahdollista ladata maantieteellisiä säteilytehoja. Tutkimuksessa käytetty vedenlaatudata oli kerätty vedenlaatumittauksista, jotka on tehty ulkopuolisen riippumattoman konsultin toimesta. Mittaukset suoritettiin noin kaksi kertaa kuukaudessa päästötarkkailusuunnitelmien mukaisesti. Rankkasateiden aikaan Vapon ympäristötarkkailijat ottivat ylimääräiset vesinäytteet, jotka täydensivät päästötarkkailua.

**Taulukko 3.2.** *Tutkimuksessa käytettävä aineisto.*

	<b>Aineisto</b>	<b>Lähde</b>
<b><i>Kustannus</i></b>	Virtausdata	Virtausmittarit
	Järjestelmädata	Aurinkovoimajärjestelmä
	Säteilydata	PVGIS
<b><i>Vedenlaatu</i></b>	Virtausdata	Virtausmittarit
	Vedenlaatudata	Vedenlaatumittausraportit

## 4. PUMPPAAMON MALLINTAMINEN

Tässä luvussa esitetään aurinkosähköjärjestelmän pumppaamon mallintamisprosessia. Mallintamisprosessin yhteydessä viitataan eri tekijöihin, jotka vaikuttavat turvetuotannon pumppaukseen ja kuinka nämä tekijät on otettu huomioon mallin luomisessa. Luodun mallin toimintaa verrattiin Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmän toimintaan, jonka jälkeen kyseistä mallia sovellettiin aurinkosähköjärjestelmän investoinnin kannattavuuslaskelmiin.

### 4.1 Järjestelmien tuottamien käyttötuntien määrittäminen

Lähtökohta aurinkojärjestelmän suunnittelulle on järjestelmän tuottama teho, mitä pumppun toiminta edellyttää. Kennoston tuottama energian määrittäminen eri ajanhetkinä tehtiin *Photovoltaic Geographical Information Systems* -sivustolta saatavien aineistojen pohjalta. Kyseiseltä sivustolta on mahdollista saada auringon tuottama säteilytehon määrä 10 vuoden ajalta maantieteellisen sijainnin perusteella. Maantieteelliseksi sijainniksi valittiin Multian Lähiseutu (62.463, 24.848), koska kyseiseltä leveyspiiriltä löytyy useita turvetuotantoalueita ja Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmä sijaitsee kyseisellä seudulla.

Aurinkovoimajärjestelmillä ei kyetä hyödyntämään kaikkea sitä energiaa, jonka aurinko tuottaa. Järjestelmien häviöt muodostuvat sekä aurinkokennojen, että järjestelmän häviöistä. Markkinoilla olevien kennostojen hyötysuhteet liikkuvat 0.14-0.21 luokassa. Hyötysuhde voi heikentyä hiukan kennostolle kerääntyneen pölyn myötä. (Aggarwal, 2018). Järjestelmän hyötysuhteena käytetään 0.75, mutta tämä voi olla pienempi tai suurempi riippuen järjestelmässä käytettävistä komponenteista (Euroopan Komissio. Joint Research Centre, 2017). Laskelmissa kennoston hyötysuhteeksi määritettiin 0.14 ja järjestelmän hyötysuhteena on käytetty arvoa 0.75.

Aurinkovoimajärjestelmiä on saatavissa kahta erilaista järjestelmätyyppiä, järjestelmä ilman akustoa tai järjestelmä akuston kanssa. Näiden välinen ero muodostuu siitä, että kennostolla tuotettua energiaa ei kerätä talteen akuttomassa järjestelmässä. Alla on esitetty tilanteet, joita akuttomalla järjestelmällä on käytön aikana.

1. Kennoston tuottama teho on pienempi kuin pumppaukseen tarvittava teho:
  - Pumppu ei käy.
2. Kennoston tuottama teho on sama tai suurempi kuin pumppaukseen tarvittava teho:
  - Pumppu käy.

Toisin kuin akuttomassa järjestelmässä, akustolla varustettu aurinkovoimajärjestelmä kerää ylimääräistä energiaa akustoille myöhempää käyttöä varten. Tilanteissa, joissa järjestelmä itsestään ei kykene tuottamaan pumppaukseen vaadittavaa tehoa, voidaan tämä puute paikata akustoon varautuneella energialla. Alla on esitetty tilanteet, jotka tulevat vastaan akullisella aurinkovoimajärjestelmällä.

*1. Kennoston tuottama teho on pienempi kuin pumppaukseen tarvittava teho:*

- Akusto kykenee paikkaamaan tarvittavan tehotarpeen, pumppu käy ja akuston energiavaraus pienenee.
- Akusto ei kykene paikkaamaan tarvittavaa tehotarpeen, pumppu ei käy ja kennoston tuottama energia menee akustolle.

*2. Kennoston tuottama teho on sama kuin pumppaukseen tarvittava teho:*

- Pumppu käyttää kaiken tuotetun energian.
- Energiaa ei varastoidu tai kuluteta akustolta.

*3. Kennoston tuottama teho on suurempi kuin pumppaukseen tarvittava teho:*

- Pumppu ei käytä kaikkea tuotettua energiaa.
- Ylimääräinen energia varastoituu akustolle akuston sallimissa rajoissa.

Mallia luotaessa huomioitiin akuston vaikutus järjestelmän tuottamiin käyttötunteihin. Akuston teoreettista mallia luodessa huomioitiin kaksi tekijää. Ensimmäinen tekijä oli, että akustoon tallennetun energian määrä ei voi olla koskaan suurempi kuin mitä sen kapasiteetti sallii. Toinen tekijä, joka huomioitiin, oli akuston käyttökapasiteetti. Käytännössä akustoon varautunut energia ei laske koskaan alle puoleen sen nimellisestä kapasiteetista ja kyseisellä toimella pidennetään akuston käyttöikää. Mallia luodessa oletettiin, että jokaisen akuston osalta käytettävä kapasiteetti olisi vain puolet ilmoitetusta. Myös Hirvinevalla akuston käyttöä on rajoitettu kyseisellä tavalla. Sen lisäksi akuston kapasiteetti oletettiin olevan 10 prosenttia pienempi kuin nimellinen, koska akuston säilytyslämpötila ei ole optimaalinen.

Edellä esitetyissä tilanteissa akuttoman ja akullisen järjestelmän osalta ei oteta kantaa tuotetun energian tarpeeseen, vaan järjestelmän kyvystä tuottaa energiaa. Siksi päädyttiin laskemaan käyttötunteja, joita järjestelmä kykenee tuottamaan erilaisille sähkökuormille. Järjestelmien oletukseksi muodostettiin, että aina kun järjestelmä kykenee tuottamaan käyttötunnin, järjestelmä tuottaa sen.

Teoreettinen malli luotiin edellä esitettyjen johtopäätösten ja järjestelmien ominaisuuksien perusteella python -ohjelmointikielellä. Tätä sovellettiin erilaisilla järjestelmätilanteissa ja taulukossa 4.1 on esitetty arvot, joista muodostettiin erilaisia järjestelmävariaatioita testaukselle. Yhden aurinkokennoston pinta-alana käytettiin  $1.62 \text{ m}^2$ . Pinta-ala on saatu 260 watin kennostosta, joita käytetään koekohteissa. Kennoston tuottama teho laskettiin alla esitetyllä kaavalla.

$$E = I_{TLT} \cdot A \cdot \eta_K \cdot \eta_{PR}, \quad (6)$$

jossa  $E$  on aurinkosähköjärjestelmän tuottama teho,  $I_{TLT}$  on neliömetrin tasoon saapuvan auringonsäteilymäärä,  $A$  on paneelien pinta-ala,  $\eta_K$  on kennoston hyötysuhde ja  $\eta_{PR}$  on järjestelmän hyötysuhde.

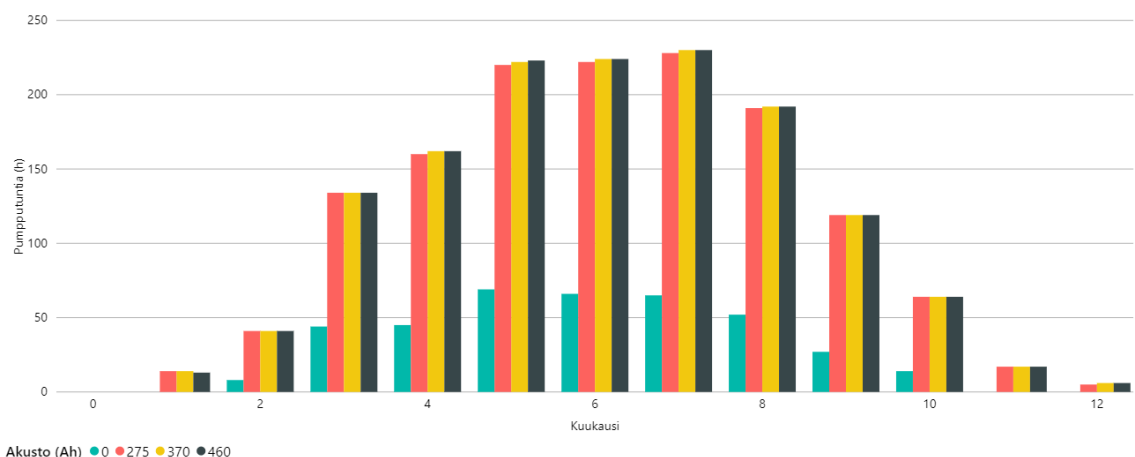
**Taulukko 4.1.** Ensimmäisen mallin testaamiseen käytetyt arvot.

Akustovaihtoehdot (Ah)	0, 275, 370 ja 460
Kennostojen lukumäärä (kpl)	16, 18, 20... 28
Kuorman koko (W)	1400, 1600, 1800... 3000

Mallin testaus suoritettiin vertailemalla eri järjestelmävaihtoehtojen kykyä tuottaa käyttötunteja, joita verrattiin keskenään. Mallin toiminta todettiin toimivaksi, jos se täytti alla esitetyt oletukset.

1. Verratessa järjestelmiä, joissa on sama akusto ja kuorma, järjestelmä useammalla kennostolla tuottaa enemmän käyttötunteja.
2. Verratessa järjestelmiä, joissa on samat kuormat ja sama määrä kennoja, suuremmalla akustolla varustettu järjestelmä tuottaa enemmän käyttötunteja.
3. Verratessa järjestelmiä, joissa on samat akustot ja sama määrä kennoja, järjestelmä pienemmällä kuormalla tuottaa enemmän käyttötunteja.

Kuvassa 4.1 on esitetty eri kuukausin pumpun mahdolliset käyttötunnit eri akustovaihtoehdoilla. Käyttötunnit on laskettu 2007-2017 säteilytiedoilla. Kuvaajan muodostamisessa käytettiin 2 kW pumppua ja 5.2 kWp kennostoa.



**Kuva 4.1.** Eri kuukausien pumpputuntien keskiarvot eri akustovaihtoehdoilla 2 kW pumppulla ja 5.2 kWp kennostolla.

Kuvaaja noudattaa samoja oletuksia kuin mitä ennen ohjelman testaamista oli oletettu. Lisäksi kuvaajasta on nähtävissä, että järjestelmän tuottama pumpputuntien määrä



vaihtelee kuukausitasolla. Kesällä aurinkoisen ajan osuus päivästä on suurempi kuin talviaikaan, mistä johtuen kesällä kokonaissäteilyn määrä on suurempi kuin talvella. Lisäksi myös säätekijät vaikuttavat kokonaissäteilyn määrään ja esimerkiksi pilvinen sää vähentää suoran säteilyn määrää maan pinnalla. Tällöin on huomattavissa heijastuvaa hajasäteilyä, joka heijastuu pilvistä ja maasta. (Luque & Hegedus, 2011)

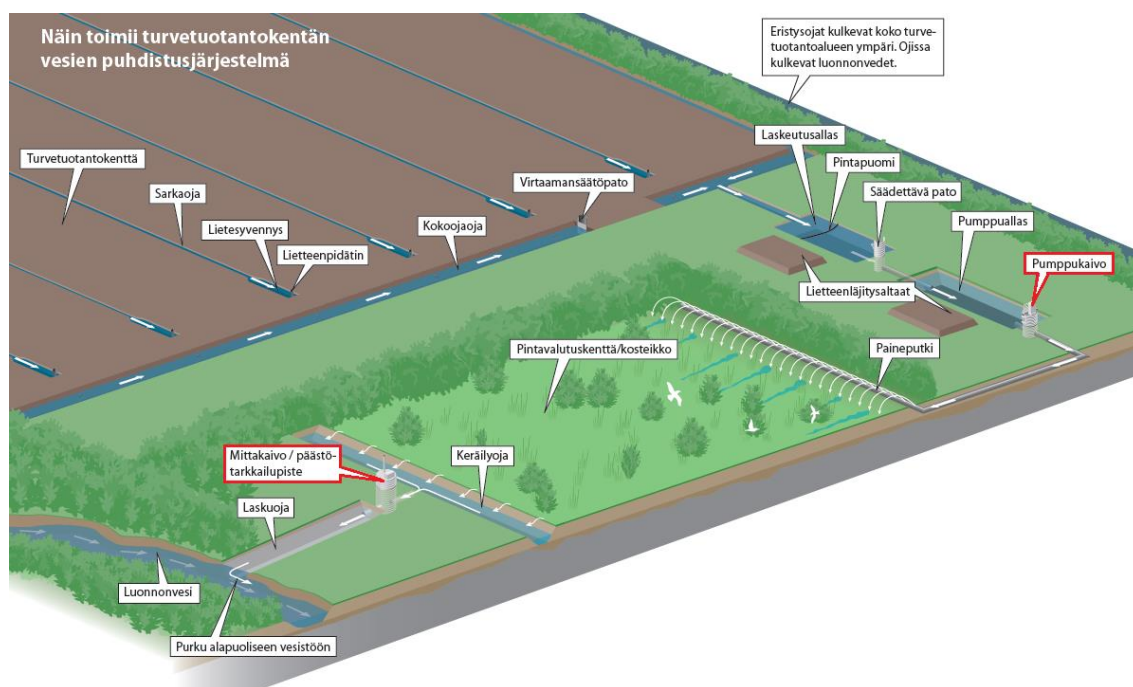
Johtopäätöksenä voidaan todeta, että verratessa akullista ja akutonta järjestelmää, akullinen järjestelmä kykenee tuottamaan huomattavasti enemmän käyttötunteja kuin akuton järjestelmä. Kun akullisia järjestelmiä verrataan keskenään, järjestelmien tuottamat käyttötunnit eivät eroa merkittävästi toisistaan.

## **4.2 Järjestelmän soveltaminen pumppaamoille**

Luotua mallia aurinkovoimajärjestelmälle ei voida soveltaa suoraan pumppaamotarkoitukseen. Jotta mallia voidaan soveltaa pumppaamoille, pitää ensin määritellä energiamäärä, joka pumppaukseen tarvitaan.

### **4.2.1 Pumppaustarpeen määrittäminen**

Ensisijaisena tehtävänä kuormituksen määrittämisessä oli selvittää, että kuinka paljon vettä pumppaamoilla pumpataan. Pumppaustarpeen määrittäminen tehtiin turvetuotantokentiltä saatavien virtaamatietojen pohjalta. Virtaamatietojen kautta määriteltiin pumpattava vesimäärä. Turvetuotantokentillä virtaamamittaus tapahtuu yleensä vain mittapadolla. Vain muutamalla alueella on kaksi eri virtaamamittausta, jotka sijaitsevat pumppaamolla ja mittapadolla. Kuvassa 4.2 on esitetty turvetuotantokentän vesienpuhdistusrakenteet, josta nähdään pumppaamon ja mittapadon sijainti pintavalutuskenttään nähden. Kuvassa pumppaamo ja mittapato on korostettu punaisella värillä.



**Kuva 4.2.** Turvetuotantokentän vesienpuhdistusrakenteet. (Hakalahti-Siren, 2015)

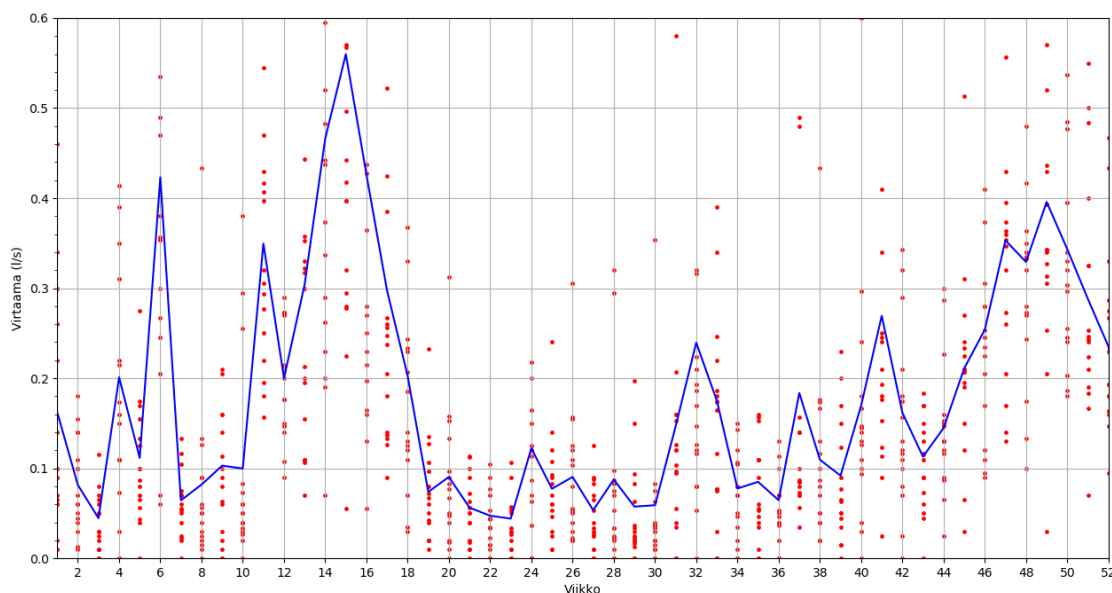
Virtaamatietojen ero on, että pumppaamolta saatava virtaamatieto on suoraan yhteydessä pintavalutuskentälle pumpattuun vesimäärään ja toisaalta mittapadon virtaamatieto kertoo siitä, että kuinka paljon vettä on poistunut pintavalutuskentältä. Pintavalutuskentältä poistunutta vesimäärää ei voida suoraan yhdistää pintavalutuskentälle pumpattuun veden määrään.

Pintavalutuskentällä tapahtuvaa toimintaa voidaan kuvata TETIS -mallilla, joka on esitetty Bussin, Francesin, Montoyan ja Julien tutkielmassa. Kyseinen malli esittää veden hydrologista kiertomallia, jonka perusteella pintavalutuskentältä tapahtuu haihduntaa ja vettä myös imeytyy maaperään. Vastaavasti pintavalutuskentälle satanut vesi ja mahdolliset lähteet pintavalutuskentällä nostavat mittapadon kautta virrannutta vesimäärää, joka ei virtaa pumppaamon kautta. (Bussi;Frances;Montoya;& Y. Julien, 2014)

Mallin perusteella pumppaamon pumppaustarve olisi luontevampi selvittää pumppaamon kautta pumpatun vesimäärän perusteella, kuin mittapadon kautta poistuneen vesimäärällä. Pumppaustarve päädyttiin kuitenkin määrittämään mittapadon virtaamatiedon kautta, koska kyseinen aineisto oli saatavilla lähes jokaiselta turvetuotantoalueelta ja alkuperäisenä tavoitteena oli luoda malli, jota voitaisiin soveltaa kaikille turvetuotantoalueille.

Turvetuotantokentät ovat keskenään erisuuruiset. Jotta eri turvetuotantoalueiden virtaamia kyettäisiin vertailemaan keskenään, virtaamatiedot oli skaalattava turvetuotantoalueen pinta-alan mukaan. Vertailussa otettiin huomioon 69 eri turvetuotantoalueen virtaamatiedot viimeisen kolmen vuoden ajalta. Virtaamatiedot skaalattiin virtaamaksi turvetuotantoalueen hehtaaria kohden.

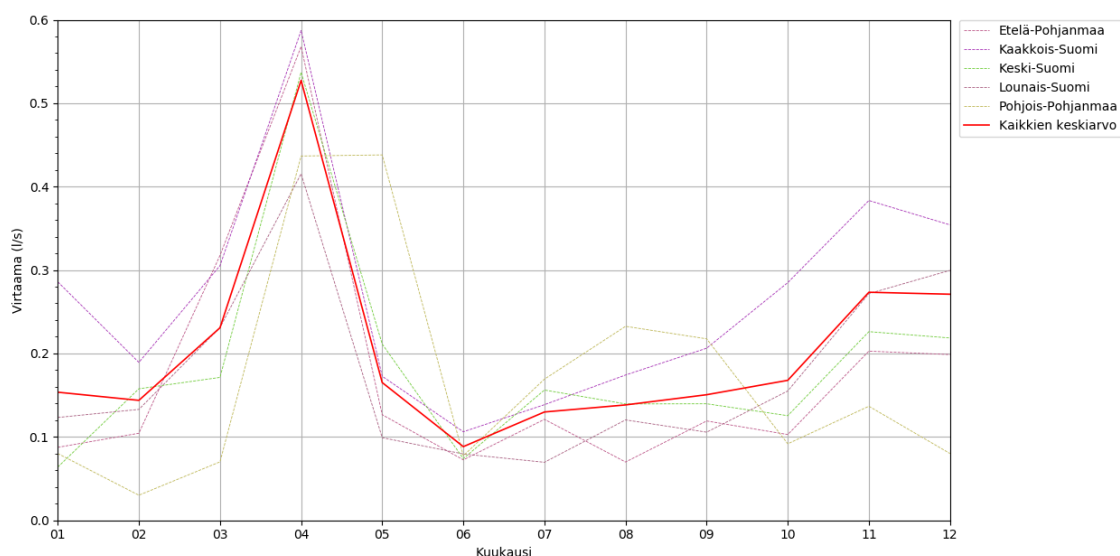
Virtaama-aineiston tarkastelun yhteydessä luotiin kuva 4.3, jossa on esitetty Lounais-Suomen turvetuotantoalueiden keskiarvovirtaamat viikkoa kohden. Kuvaajassa pisteet ovat eri turvetuotantoalueiden viikkojen keskiarvovirtaamia hehtaaria kohden ja sinisellä viivalla on merkitty näiden turvetuotantoalueiden keskiarvovirtaamat hehtaaria kohden vuoden jokaiselta viikolta. Muodostetussa kuvaajassa esitetään arvot 0.0 – 0.6 l/s välillä.



**Kuva 4.3.** Viikkotasolla esitetty mittapadon keskiarvovirtaamat hehtaaria kohden.

Kuvaaja osoittaa, että turvetuotannon vesien pumppauksessa on kaksi eri vuodenaikaa, jolloin pumppaustarve on huomattavasti suurempi. Nämä ajanhetket ovat lumien sulamisvedet kevään aikana ja syksyn syyssateet. Se myös osoittaa, että pumppaamoiden mitoitus tulvatilanteiden mukaan on huomattavasti suurempi kuin mikä on keskimääräinen tarve.

Edellä esitetty kuvaaja muodostettiin myös Etelä-Pohjanmaan, Kaakkois-Suomen, Keski-Suomen ja Pohjois-Pohjanmaan turvetuotantoalueilta mitattujen virtaamien osalta. Näiden kuvaajien pohjalta luotiin kuva 4.4, joka esittää eri alueilla sijaitsevien turvetuotantoalueiden keskiarvovirtaamia hehtaaria kohden eri kuukausina. Lisäksi kuvaajaan on lisätty punaisella viivalla kaikkien turvetuotantoalueiden keskiarvovirtaamat hehtaaria kohden.



**Kuva 4.4.** Alueelliset erot mittapadon virtaamien osalta kuukausitasolla.

Suurin osa turvetuotantoalueista noudattaa yleistä virtaaman keskiarvoa, joka on edellisessä kuvaajassa merkitty punaisella. Vain Pohjois-Suomen osalta lumien sulamisvesien ajankohta tapahtuu myöhemmin kuin muilla alueilla. Tämä selittyy sillä, että kevät alkaa Pohjois-Suomessa hiukan myöhemmin kuin muualla Suomessa.

Aikaisemmin tuli esille, että mittapadon kautta kulkenut vesimäärä ei ole suoraan verrannollinen pumppaamolla pumpattuun veden määrään. Selvittääksemme pumppaamolta pumpattu vesimäärä, pitää määrittää pumppaamolta pumpatun ja mittapadolta poistuneen vesimäärän välille suhde. Kun suhde on tiedossa, mittapadon virtaamat voidaan muuttaa pumppaamon virtaamiksi ja tätä kautta selvittää pumpattavan veden määrä.

Suhdetta pumppaamon ja mittapadon välisille vesimäärille selvitettiin Joutsuon turvetuotantoalueella. Joutsuon turvetuotantoalue on yksi niistä harvoista kohteista, jossa pumppaamolle on asennettu virtaamamittari. Tämän vuoksi kohteesta oli saatavilla virtaamatietoja kahden vuoden ajalta (7.7.2016 – 18.7.2018) sekä pumppaamolta että mittapadolta. Taulukossa 4.2 on Joutsuon turvetuotantoalueen kautta määritetyt suhteet mittapadon ja pumppaamon välisille vesimäärille.

**Taulukko 4.2.** Mittapadon ja pumppaamon väliset suhteet kuukausitasolla.

Vuosi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
2016							44,61 %	82,48 %	71,22 %	86,96 %	88,96 %	80,22 %	75,74 %
2017	55,63 %	72,55 %	95,61 %	92,09 %	66,25 %	78,01 %	45,58 %	64,17 %	73,84 %	89,52 %	87,32 %	93,29 %	76,16 %
2018	89,83 %	77,79 %	67,04 %	94,87 %	76,59 %	63,37 %	48,95 %						74,06 %
Total	72,73 %	75,17 %	81,33 %	93,48 %	71,42 %	70,69 %	46,38 %	73,32 %	72,53 %	88,24 %	88,14 %	86,76 %	75,47 %

Taulukon perusteella voidaan todeta, että mittapadon ja pumppaamon väliset suhteet vaihtelevat huomattavasti. Tulokset myös vahvistavat sen, että haihdunta on vähäisempää kevään sulamisvesien ja syksyn syyssateiden aikana. Pienimmillään mittapadon kautta kulki alle puolet siitä vedestä, joka pumpattiin pintavalutuskentälle. Suhteiden perusteella

päädettiin käyttämään kerrointa 1.4 kesäajan mittapadon virtaamiin, eli toukokuu-syyskyyän väliselle ajalle, ja muiden kuukausien osille kerrointa 1.1. Kertoimien avulla mittapadon virtaamat suhteutetaan pumppaamon virtaamiksi. Taulukossa 4.3 on esitetty keskiarvovirtaamat kuukausittain, joiden perusteella voidaan määrittää pumppaustarve kuukautta kohden.

**Taulukko 4.3.** Keskiarvovirtaamat hehtaaria kohden eri kuukausilta.

<b>Tammikuu</b>	0.17 l/s/ha	<b>Heinäkuu</b>	0.18 l/s/ha
<b>Helmikuu</b>	0.17 l/s/ha	<b>Elokuu</b>	0.20 l/s/ha
<b>Maaliskuu</b>	0.25 l/s/ha	<b>Syyskuu</b>	0.21 l/s/ha
<b>Huhtikuu</b>	0.58 l/s/ha	<b>Lokakuu</b>	0.19 l/s/ha
<b>Toukokuu</b>	0.24 l/s/ha	<b>Marraskuu</b>	0.30 l/s/ha
<b>Kesäkuu</b>	0.13 l/s/ha	<b>Joulukuu</b>	0.30 l/s/ha

## 4.2.2 Pumppukokojen valinta

Pumpun tarvitsemaan tehoon vaikuttavat tilavuusvirta, nostokorkeus, pumpattavan aineen tiheys sekä pumpun hyötysuhde. Tilavuusvirtaan ja nostokorkeuteen voidaan vaikuttaa pumpun valinnalla. Akseliteho, jonka pumpun pitää kyetä tuottamaan vaadittavan virtaaman tuottamiseksi, voidaan laskea kaavalla 7. (Motiva, 2011)

$$P_a = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_p}, \quad (7)$$

jossa  $P_a$  on pumppaukseen tarvittava akseliteho,  $\rho$  on virtausaineen tiheys,  $g$  on vetovoiman kiihtyvyys,  $Q$  on tilavuusvirta,  $H$  on nostokorkeus ja  $\eta_p$  on pumppauksen hyötysuhde.

Pumppaamon kapasiteetin on vastattava tulvatilanteiden mukaisia virtaamia, jonka johdosta pumppaamoiden pumput ovat ylimitoitettuja käyttöönsä nähden. Affiniteettilain mukaan pumpun tuoton kasvaessa, pumppaukseen vaadittava teho kasvaa kuutiollisesti verrattuna pumpun tuoton kasvuun. Vaadittavan tehon kasvu muodostuu pumppausnostokorkeudesta ja putkiston virtausvastuksen muodostavista tekijöistä.

Vastaavasti, jos pumpun tuottoa pienennetään, vaadittavan tehon kasvu pienenee kuutiollisesti affiniteettilain perusteella. Tämän myötä myös pumppausaika pitenee. Aurinkosähköjärjestelmän myötä päädyttiin sähköistämään pientä pumppua, joka pumppaisi vettä pienemmällä virtaamalla pidempiä ajanjaksoja. Pienempi pumppu sijoitettiin suuremman pumpun rinnalle ja suurta pumppua käytettäisiin järjestelmämuutoksen jälkeen tilanteissa, jolloin pumppaustarve on suurempi, kuten sulamisvesien ja tulvatilanteiden aikana.

Haaste pienemmän pumpun mitoittamisen osalta on, että jos pumppu ylimitoitetaan käyttöönsä nähden, se vaatii myös aurinkojärjestelmän kapasiteetin kasvattamista. Vastaa- vasti, jos pumppu mitoitetaan liian pieneksi, järjestelmän hyöty jää pieneksi. Jotta pystytään määrittämään oikea mitoitusvirtaama pienemmälle pumpulle, pumppaustarve määritettiin keskiarvovirtaamien perusteella.

Kesäkuukausien aikana kuukauden keskiarvovirtaama pumppaamolla on 0.13 – 0.24 l/s hehtaaria kohden. Taulukossa 4.4 on esitetty keskiarvovirtaamat pumppaamolla, jotka on laskettu keskiarvovirtaaman perusteella erikokoisille turvetuotantoalueille. On kuitenkin huomioitava, että aurinkosähköjärjestelmällä on rajattu toiminta-aika, johon vaikuttaa kennoston tuottama energia ja mahdollisen akuston suuruus. On siis oletettavaa, että järjestelmän myötä asennettava pienempi pumppu ei käy ympärivuorokautisesti.

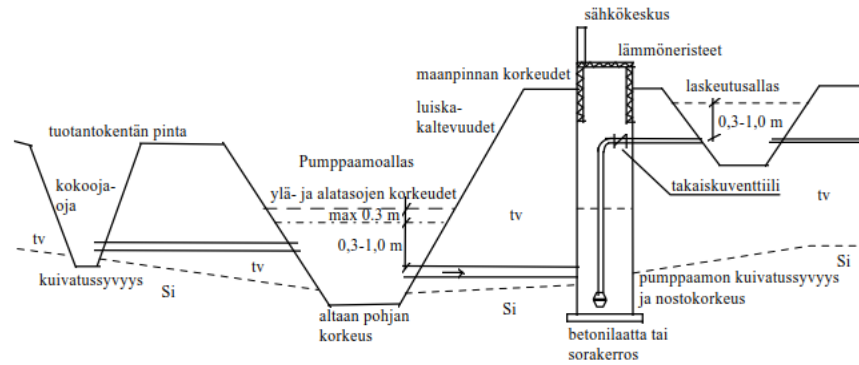
**Taulukko 4.4.** Keskiarvovirtaamat kuukautta kohden erisuuruisille turvetuotantoalueille.

Kuukausi	40 ha	60 ha	80 ha
Huhtikuu	9.6	14.4	24.0
Toukokuu	9.6	14.4	24.0
Kesäkuu	5.2	7.8	24.0
Heinäkuu	7.2	10.8	14.4
Elokuu	8.0	12.0	16.0
Syyskuu	8.4	12.6	16.8
Lokakuu	7.6	11.4	15.2

Keskiarvovirtaamien, pumpulta vaadittava tuotto ja tiedossa olevien staattisten nostokorkeuksien, sekä putkiston ominaisuuksien avulla voidaan määrittää pumppaukselta vaadittavat tehot. Luotavan mallin yleistävän piirteen takia pumppaukseen vaadittavia tehoja ei erikseen ryhdytty määrittämään. Yleisesti ottaen staattinen nostokorkeus liikkuu samassa suuruusluokassa 4 ja 6 metrin välillä. Kuvassa 4.5 on esitetty turvetuotantoalueiden pumppaamoiden tyypikuva, josta nähdään pumppaamon rakenne. Pumpulta vaadittava tuotto on esitetty kaavassa 8.

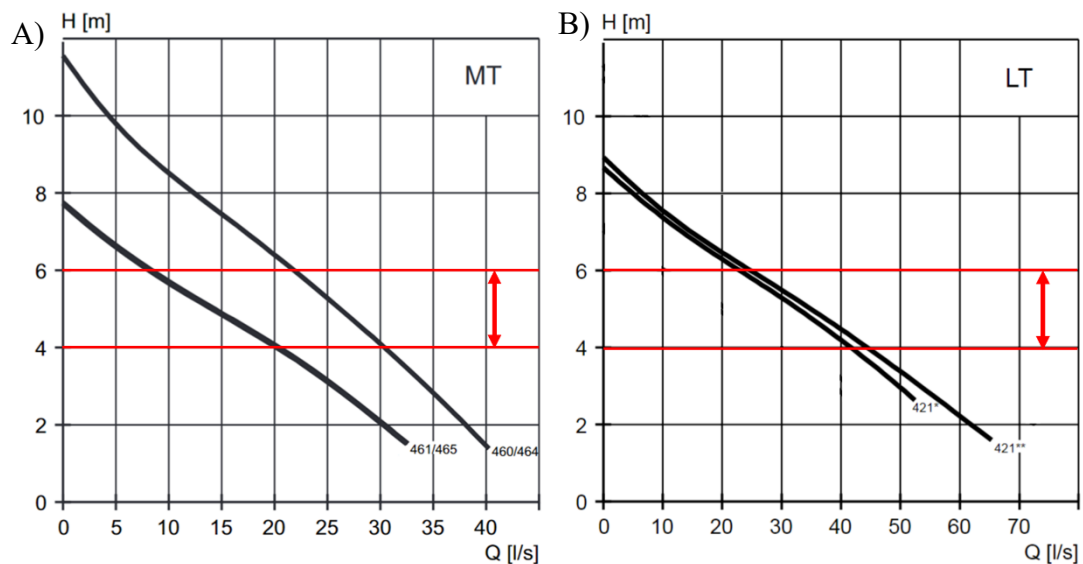
$$v_p = \bar{v}_p \cdot \frac{t_p}{24}, \quad (8)$$

jossa  $v_p$  on pumpulta vaadittu tuotto,  $\bar{v}_p$  on pumpun tuoton keskiarvo vuorokaudessa ja  $t_p$  on pumpun toiminta-aika vuorokaudessa.



**Kuva 4.5.** Pumppaamon tyypikuva mitoitusarvoista. (Alatalo & Marttila, 2011)

Nostokorkeuden ja keskiarvovirtaamien perusteella valittiin kolme erikokoista pumppua. Kaksi pumppua Flygt NP 3085 mallistosta; 1.4 kW ja 2.0 kW, ja yksi 3.1 kW pumppu Flygt N 3102 mallistosta. Kuvassa 4.6A on esitetty kahden 3085 -mallin tuottokäyrät, jossa 462/465 tuottokäyrä on 1.4 kW pumpulle ja 460/464 tuottokäyrä on 2.0 kW pumpulle. Kuvassa 4.6B on 3.1 kW pumpun tuottokäyrä 421\* ja 421\*\*. Kuvaajiin on merkitty punaisin viivoin 4 ja 6 metrin nostokorkeudet.



**Kuva 4.6.** Valittujen pumppujen pumppukäyrät, A) MT-tyyppisten ja B) LT-tyyppisen.

Pumppukäyrien perusteella määriteltiin pumppujen tuottamat virtaamat pumppaamoilla. Pumppauksessa tapahtuvan nostokorkeuden muutosta ei huomioida. Pumpun ottama sähköinen teho on suurempi kuin pumpun akselilta mitattava teho. Pumpussa tapahtuu häviöitä, jotka muodostuvat juoksupyörän sisäisistä häviöistä ja pumpun säädöstä (Stoffel, 2015). Pumppauksen vaatima sähköteho voidaan määritellä pumpun ja pumpun säätöjen hyötysuhteiden avulla. Laskentapa on esitetty kaavassa 9.

$$P_v = \frac{P_a}{\eta_M \cdot \eta_S}, \quad (9)$$

jossa  $P_v$  on pumpun ottama sähköteho,  $P_a$  on pumpun akseliteho,  $\eta_M$  on sähkömoottorin hyötysuhde ja  $\eta_S$  on säädön hyötysuhde.

Jos aurinkovoimajärjestelmän varassa pumpattava vesimäärä pumpulla on yhtä suuri tai suurempi kuin se vesimäärä, joka pitää pumpata pintavalutuskentälle kuukauden aikana, oletetaan, että suurempaa pumppua ei käytetä. Lyhyet sadejaksot, jolloin suuren pumpun tarvitsee pumpata vettä, jätettiin laskelmissa ulkopuolelle. Pienemmän pumpun pumpputunneiksi valittiin vesimäärän edellyttämät pumpputunnit.

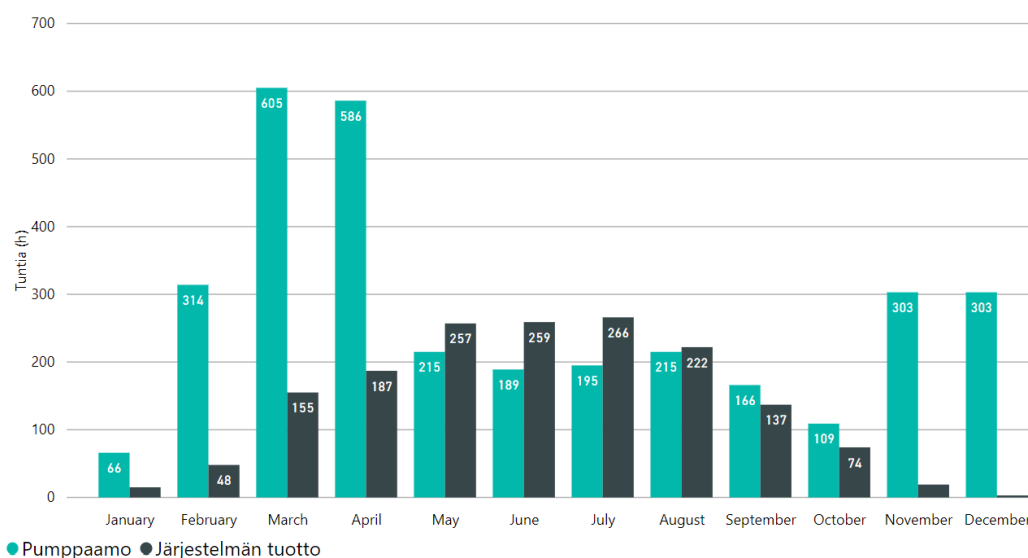
Tilanteissa, joissa järjestelmän kapasiteetti on pienempi kuin kuukaudessa pumpattava vesimäärä, laskentaa jatkettiin. Kyseissä tilanteissa pitää myös huomioda, että aggregaatin käydessä pieni ja iso pumppu käyvät samanaikaisesti, koska suuremman pumpun dieselaggregaatti syöttää pientä pumppua. Pienen pumpun pumpputunnit muodostuivat tässä tilanteessa aurinkovoimajärjestelmän myötä tulevista tunneista ja aggregaatin käyttötunneista.

### 4.2.3 Pumppaamon yhdistäminen luotuun malliin

Aikaisemmin luotu aurinkovoimajärjestelmän malli tuottaa mahdollisten käyttötuntien määrän eri kuormituksille. Pumppauksesta syntyvä kuormitus pitää määritellä pumpattavan vesimäärän kautta ja arvioida sitä, kuinka paljon aurinkovoimajärjestelmällä sähköistettävä pieni pumppu kykenee pumppaamaan tästä vesimäärästä.

## 4.3 Vertaaminen todelliseen toimintaan

Kuvassa 4.7 on esitetty tarvittavat pumpputunnit käytettäessä pientä pumppua mustalla ja aurinkosähkøjärjestelmän kapasiteetti pienen pumpun käyttöön vihreällä. Järjestelmän tuottamat pumpputunnit mallinnettiin arvoilla, jotka vastaavat Hirvinevan aurinkojärjestelmää. Järjestelmän kennoston koko on 4.68 kWp ja akuston suuruus on 335 Ah. Järjestelmällä sähköistettävän pikkupumpun nimellinen teho on 2 kW ja sähköiseksi tehonkulutukseksi arvioitiin 2.8 kW.



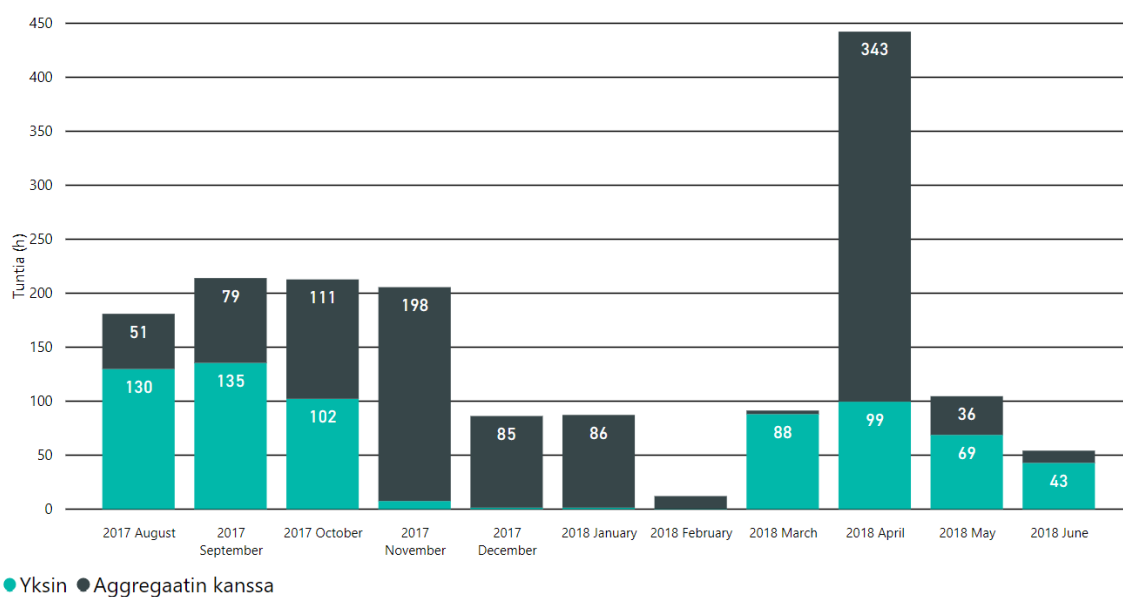
**Kuva 4.7.** Järjestelmien tuottamien pumpputuntien määrä ja tarve kuukausitasolla.



Mallin perusteella kesäaikaan järjestelmällä olisi mahdollista pumpata kaikki se vesi, joka pitää pumpata pintavalutuskentälle. Lumien sulamisvesien aikana järjestelmän pienen pumpun kapasiteetti ei riitä sulamisvesien pumppaukseen. Tämän perusteella aggregaattilla sähköistettävän suuren pumpun käyttö vähentyisi lähes 40 prosentilla ja kesäaikaan pieni pumpppu riittäisi vesien pumppaukseen.

Mallia testattiin vertaamalla Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmästä saatua aineistoja ja mallin toimintaan. Jos mallin toiminnassa havaittiin puutteita, mallin toimintaa tutkittiin ja korjattiin kunnes toiminta vastasi Hirvinevan aurinkojärjestelmän arvoja. Tarkastaessa mallia todelliseen toimintaan on huomioitava, että järjestelmässä on ollut häiriöitä, joiden vuoksi järjestelmä ei ole ollut jatkuvasti käyttökunnossa. Esimerkiksi 18.7.2017 päivä aurinkovoimajärjestelmässä ilmeni akustovika, jonka vuoksi järjestelmä ei ollut käyttökunnossa 3 viikkoon. Alustavan testin perusteella pyrittiin havaitsemaan selkeät eroavaisuudet mallin ennustaminen pumpputuntien ja Hirvinevan todellisten pumpputuntien määrissä.

Vertailtavat pienen pumpun pumpputunnit laskettiin pumppaamon virtaamamittarin kautta ja tarkasteltavaksi ajanväliksi valittiin 14.7.2017-30.6.2018. Pienen pumpun nimellinen virtaama on 22.5 l/s, joten aineistoa tarkastaessa virtaamat alle 25 l/s virtaamat ovat muodostuneet pelkästään pienen pumpun pumppauksesta. Tätä suuremmat virtaamat ovat syntyneet suuren ja pienen pumpun yhteisestä pumppauksesta, koska suuren pumpun käydessä myös pieni pumpppu pumppaa vettä. Kuvassa 4.8 on esitetty lasketut pumpputunnit palkein. Kuvaajassa vihreällä värillä on esitetty tunnit, jolloin pieni pumpppu on pumpannut yksin, ja mustalla värillä on esitetty tunnit, jolloin pieni pumpppu on käynyt yhtäaikaista suuren pumpun kanssa.



**Kuva 4.8.** Aurinkovoimajärjestelmällä sähköistettävän pienen pumpun käyttötunnit.

Kuvaajasta voidaan johtaa johtopäätös siitä, että luodun mallin ja Hirvinevan toiminnan välillä on selkeää eroavaisuutta. Mallin perusteella pienen pumpun kapasiteetin pitäisi

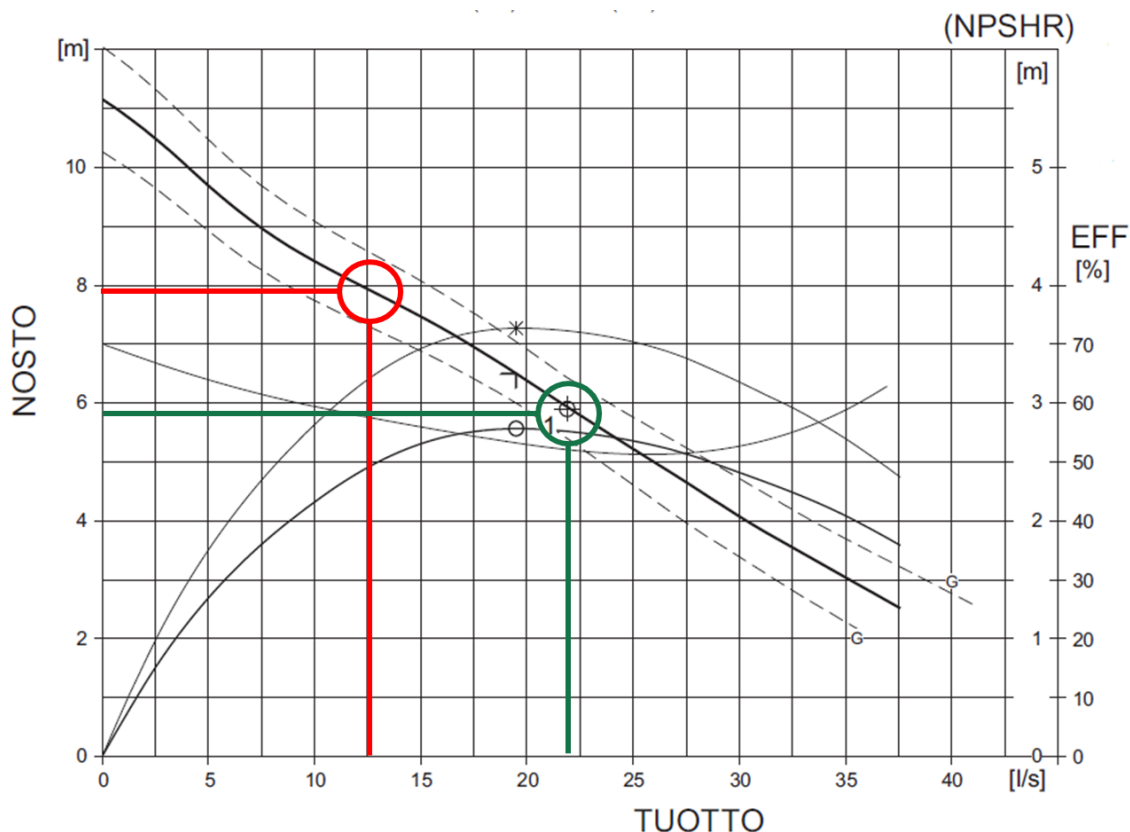
riittää kokonaan ilman, että suuremmalle pumpun käytölle olisi tarvetta. Kuitenkin, esimerkiksi 2017 elokuussa mallin perusteella pienen pumpun pumpputunnit pitäisi olla 215 tuntia Hirvinevalla ja todellisuudessa pumpputunnit ovat olleet 180 tuntia. Tästä 180 tunnista pumppu on pumpannut vettä 130 tuntia yksin ja 51 tuntia suuren pumpun kanssa. Nämä arvot eivät vastaa mallin arvioimia pumpputunteja.

Johtopäätökset, jotka muodostettiin tehdystä vertailun pohjalta, ovat seuraavat. Joko pienen pumpun tuotto on pienempi kuin sen nimellinen tuotto tai arvio pumppaustarpeesta on liian pieni. Näissä tilanteissa pienen pumpun kapasiteetti ei riitä veden pumppaukseen pintavalutuskentällä, joten muodostuu tarve suuremman pumpun toiminnalle. Mallin toiminnan tarkastelu aloitettiin pienen pumpun toiminnasta.

#### 4.3.1 Pumppaamon pumppujen tarkastaminen

Pumppaamolta mitattavia virtaamatietoja tarkastaessa selvisi, että pienen pumpun virtaama on ollut 8-13 l/s välillä riippuen taajuusmuuttajan ohjauksesta. Joissain tilanteissa pienen pumpun tuotto on hiukan yli 20 l/s. Suuren pumpun pumatessa yksin, virtaama on ollut 50 l/s. Pienen ja suuren pumpun pumatessa yhdessä, pumppaamolta on mitattu 58 l/s virtaama.

Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmällä sähköistettävän pienen pumpun nimelliseksi virtaamaksi on ilmoitettu 22.5 l/s. Tätä arvoa käytettiin mallin luomisessa ja alkuperäinen oletamus oli se, että pumpun tuotto ei muutu tästä virtaamasta. Pumppu on kuitenkin suurimman osan ajasta pumpannut lähes puolet pienemmällä virtaamalla. Ilmoitetun ja mitattujen virtaamien välillä on nähtävissä selkeät eroavaisuudet. Eroavaisuuksia pyrittiin selvittämään tarkastelemalla kuvassa 4.9 esitettyä pienen pumpun tuottokäyrää. Kuvassa vihreällä on merkitty pumpun mitoituksessa käytettyjä arvoja ja punaisella pumpun todellinen tuotto, ja sitä vastaava nostokorkeus.



**Kuva 4.9.** Hirvinevan pienen pumpun (2 kW) tuottokäyrä.

Kuvasta huomataan, että oletetun ja todellisen pienen pumpun nostokorkeuden välinen eroavaisuus on huomattavasti suurempi kuin mitä oletettiin. Pumpulle on mitoitettu ennen järjestelmän asennusta 6 metrin nostokorkeus, jossa pumppu tuottaa 22.5 l/s virtaaman. Todellinen nostokorkeus vaikuttaa olevan suurempi, jonka vuoksi pumpun tuotto on oletettua pienempi.

Pumpun nostokorkeus muodostuu kahdesta tekijästä, dynaamisesta ja staattisesta nostokorkeudesta. Staattinen nostokorkeus muodostuu pumppaussysteemiin vaikuttavista korkeus- ja paine-eroista. Dynaaminen nostokorkeus muodostuu virtausvastuksesta, joka muodostuu putkistosta ja rakenneosien virtausvastuksista (Milnes, 2009). Joten se, että pieni pumppu on liitetty pumppualtaasta lähtevään putkeen kahdella 90 asteen kulmalla, voi kasvattaa rakenneosista muodostuvaa nostokorkeutta.

Pumpun pienempi tuotto selittyy sillä, että järjestelmän asennuksen jälkeen pumppaustapa on muutettu. Pienellä pumpulla pyritään pitämään pumppuallas mahdollisimman tyhjänä ja aikaisemmin altaan pinnankorkeutta on pidetty korkeammalla. Muutos on nostanut pienen pumpun nostokorkeutta, jonka myötä pumpun tuotto on pienentynyt. Vaikka muutos on ollut pieni (alle 2 metriä), sen vaikutus pumpun tuottoon on suuri. Tästä johtuen uusissa laskennoissa oletettiin, että normaalitilanteessa pumpun tuotoksi mitoitetaan virtaama, jonka pumppu tuottaa 8 metrin nostokorkeudella. Muutoksella luotu malli vastaa paremmin todellista toimintaa.

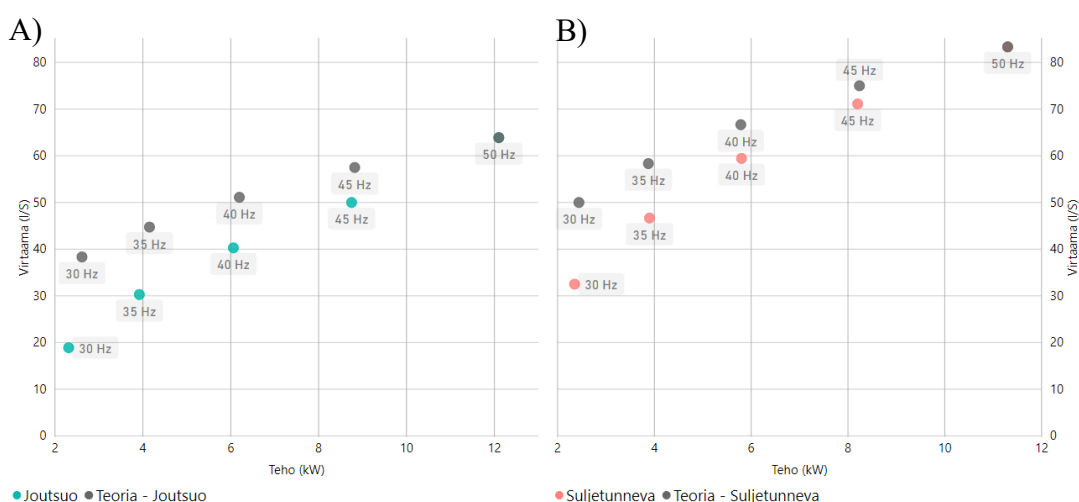
Virtaaman vaihteluväli 8 ja 13 l/s välillä selittyy taajuusmuuttajasta. Pientä pumpppua ohjataan taajuusmuuttajalla, joka ohjaa pumpulle syötettävää taajuutta akuston varaustason perusteella. Kun akuston varaustaso on 95 prosenttia tai korkeampi, pumpppu pyörii nimellisellä nopeudellaan. Varaustason laskiessa pienemmäksi, pumpun pyörimisnopeus lasketaan 30 hertsiin.

#### 4.3.2 Affiniteettilain soveltuminen koekohteella

Pienen pumpun toiminta nostaa myös esiin toisen kysymyksen. Aurinkojärjestelmän keräämän datan perusteella pienen pumpun tehontarve on 1.2 kW, kun pumpppu tuottaa 6 l/s virtaaman. Tehontarve on 2.2 kW, kun pumpppu tuottaa 12 l/s virtaaman. Affiniteettilain mukaisesti pumpun tehontarve kasvaa kuutiollisesti virtaaman kasvua kohden. Aineiston perusteella pumpun teho on kasvanut lähes samassa suhteessa virtaaman kanssa, joka ei tue affiniteettilain väitettä.

Syytä siihen että, minkä vuoksi affiniteettilaki ei päde Hirvinevan pienen pumpun kohdalla, pyrittiin selvittämään kahdella koekohteella suoritettavassa testissä. Testissä pyrittiin määrittämään putkiston vaikutusta pumppaukseen. Koekohteina käytettiin Joutsuon ja Suljetunnevan turvetuotantoalueita, joihin on asennettu taajuusmuuttajaohjatut pumpput. Näitä pumpppuja pyöritettiin eri taajuuksilla 30 hertsistä 50 hertsiin 5 hertsin välein, ja aineistosta saatavien arvojen kautta laskettiin pumpun käyttämä energia sekä pumppaukseen kuluva aika suhteessa nimelliseen tuottoon.

Kuvassa 4.10 on esitetty Suljetunnevalta ja Joutsuolta se, että kuinka suuren virtaaman pumpppu on tuottanut ja kuinka paljon tehoa pumpppu on käyttänyt pumppaukseen. Kuvaa-jiin on myös vertailun vuoksi lisätty affiniteettilain perusteella tehdyt olettamukset. Kuvassa havaittava eroavaisuus Suljetunnevan ja Joutsuon pumppaamon virtaamien välillä muodostuu pumppaamoiden nostokorkeuksista. Suljetunnevalta nostokorkeus on pienempi kuin Hirvinevalta, joten sama pumpppu tuottaa suuremman virtaaman kuin Hirvinevalta.



**Kuva 4.10.** A) Joutsuon ja B) Suljetunnevan pumpppujen virtaamat eri pyörimisnopeuksilla.

Testin perusteella koekohteet eivät käyttäydy kuten affiniteettilain perusteella voitaisiin olettaa. Pumppu tuottaa pienemmällä taajuuksilla huomattavasti pienemmän virtaaman kuin alustavasti oletettiin. Tästä johtuen myös energiansäästö pumppaamalla pienemmällä taajuudella pienenee. Kun affiniteettilain perusteella koekohteille odotettiin muodostuvan lähes 60 prosentin säästöjä energiankulutuksesta, Hirvinevalla energiansäästö oli 47 prosenttia ja Joutsuolla vain 35 prosenttia. Testin perusteella voidaan todeta se, että koekohteiden energiansäästö ei yllä affiniteettilain ennustamiin säästöihin. Suurin tekijä siihen, että koekohteiden tulosten ja affiniteettilain mukaisen energiansäästön ja pumpausajan suhteen on eroavaisuutta, muodostuu affiniteettilain perusolettamuksesta. Affiniteettilaki on esitetty kaavoissa 9a, 9b ja 9c.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (9a)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2, \quad (9b)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3, \quad (9c)$$

missä  $Q$  on tilavuusvirta,  $H$  on nostokorkeus ja  $P$  on pumppaukseen tarvittava teho.

Kuten aikaisemmin mainittiin, nostokorkeus muodostuu kahdesta eri tekijästä; dynaamisesta ja staattisesta nostokorkeudesta. Tilavuusvirran muutos vaikuttaa vain dynaamiseen nostokorkeuteen, joka muodostuu virtausvastuksista. Virtausvastukset ovat neliöllisessä suhteessa tilavuusvirran. Dynaamisen nostokorkeuden muodostuminen on nähtävissä kaavoista 10, jossa esitetään kaava dynaamisen nostokorkeuden määrittämiseen, ja kaavasta 11, joissa esitetään kaava putkiston ja rakenneosien virtausvastuksen laskentaan. (Milnes, 2009)

$$H_D = \frac{\Delta p_v}{\rho \cdot g}, \quad (10)$$

jossa  $H_D$  on dynaaminen nostokorkeus,  $\Delta p_v$  on putkiston ja rakenneosien virtausvastus,  $\rho$  on virtausaineen tiheys ja  $g$  on vetovoiman kiihtyvyys.

$$\Delta p_v = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2}, \quad (11)$$

jossa  $\Delta p_v$  on putkiston ja rakenneosien virtausvastus,  $l$  on putken pituus,  $d$  on putken halkaisija,  $v$  on virtausnopeus,  $\rho$  on virtausaineen tiheys ja  $g$  on vetovoiman kiihtyvyys.

Affiniteettilaissa tapahtuva oletus siitä, että nostokorkeus muodostuisi suurimmaksi osin dynaamisesta nostokorkeudesta, ei sovellu turvetuotannon vesien pumppaukseen. Turvetuotannon vesien pumppauksessa pumpun kokonaisnostokorkeus muodostuu suurimmaksi osin staattisesta nostokorkeudesta. Tästä johtuen affiniteettilakia ei kyetä soveltamaan turvetuotannossa. Erityisesti pienillä virtaamilla dynaamisen nostokorkeuden osuus kokonaisnostokorkeudesta on niin pieni, että se ei ole merkittävä tekijä pumppaukseen

vaadittavan tehon kannalta. Kyseinen tilanne muodostuu aurinkojärjestelmällä pyöritetävän pienen pumpun osalta, kun pumppua pyöritetään pienemmällä nopeudella ja pyörimisnopeuden muutosta ei voida tunnistaa energiankulutuksessa.

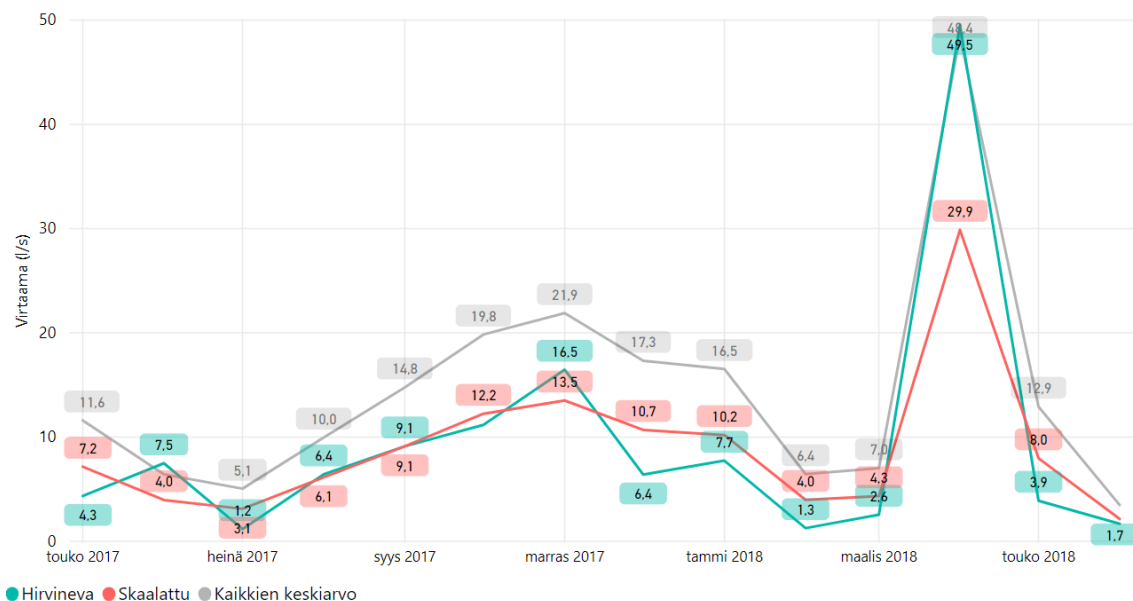
Testien myötä ilmenevä staattisen nostokorkeuden osuus kokonaisnostokorkeudesta nostaa esiin tämän tärkeyden pienen pumpun mitoittamisessa. Jos energiansäästöä halutaan kasvattaa vesien pumppauksessa pienellä pumpulla, sen käynnistysrajaa on nostettava. Pumpun käynnistysrajaa on mahdollista nostaa, koska tällä hetkellä pumpulla pidetään vedenpinta mahdollisimman matalalla pumppualtaassa. Käynnistysrajan nostamisella pumppualtaan vedenpinnan korkeus kasvaisi. Paras tapa säästää pumppauskustannuksissa on siis pitää pumppujen kokonaisnostokorkeus pienenä, joka olisi mahdollista korkeammalla käynnistysrajalla (Motiva, 2011). Pienemmällä nostokorkeudella olisi mahdollista mitoittaa pienempi pumppu.

### 4.3.3 Pumppaustarpeen tarkastaminen

Pumppaamon pumpputunnit ovat riippuvaiset pumppujen kapasiteetista ja vesimäärästä, joka tarvitsee pumpata pintavalutuskentälle. Keskiarvovirtaamien kautta on mahdollista laskea vesimäärä, joka kuukaudessa on pumpattu pintavalutuskentälle. Mallin luomisen yhteydessä laskettiin mittapadon keskiarvovirtaamat hehtaaria kohden eri kuukausilta, jotka skaalattiin vastaamaan pumppaamon keskiarvovirtaamia.

Taulukon 4.3 esitettyjen arvojen oikeellisuuden varmistaminen, turvetuotantoalueiden keskiarvovirtaamia verrattiin Hirvinevalla mitattuihin virtaamiin. Sen lisäksi tarkastettiin kertoimet, joilla muutettiin mittapadon virtaamat pumppaamon virtaamiksi. Tämä suoritettiin tarkastelemalla pintavalutuskentälle pumpatun ja lähtevän veden suhdetta. Vertailussa ilmeni se, että laskettujen ja todellisten virtaamien välillä on eroavaisuuksia. Virtaaman käyttäytyminen eri kuukausilta vaikutti samankaltaisilta, mutta lasketut virtaamat olivat huomattavasti suuremmat kuin mitä Hirvinevalla oli mitattu.

Skaalaamalla lasketut virtaamat 0.62 pienemmäksi lasketut keskiarvovirtaamat vastaavat Hirvinevalla mitattuja virtaamia. Skaalauksenkin jälkeen on havaittavissa eroavaisuuksia, kuten esimerkiksi 2018 toukokuun osalta. Kuvassa 4.11 on esitetty virtaamat toukokuu 2017 - toukokuu 2018 ajalta, harmaalla turvetuotantoalueiden keskiarvovirtaamat hehtaaria kohden, vihreällä Hirvinevan todelliset keskiarvovirtaamat ja punaisella kaikkien turvetuotantoalueiden mittapatojen skaalatut keskiarvovirtaamat.

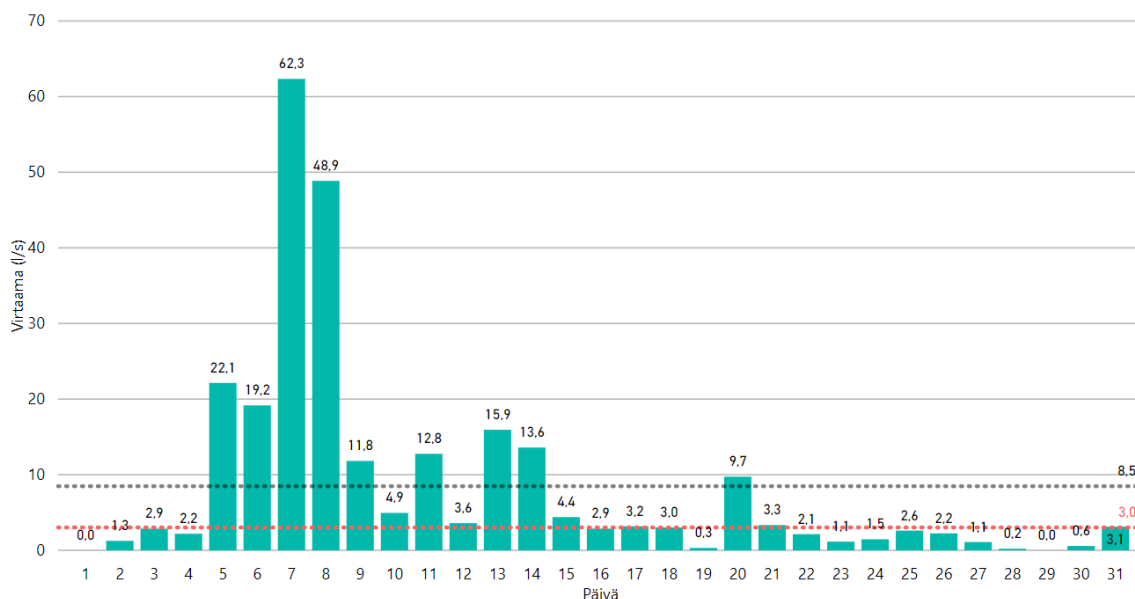


**Kuva 4.11.** Mittapadon laskettujen ja todellisten keskiarvovirtaamien vertaaminen.

Pintavalutuskentälle pumpatun ja lähtevän veden suhde määriteltiin mallia luotaessa Joutsuon turvetuotantoalueen perusteella. Joutsuon perusteella kesäajalla kentälle oletettiin jäävän vähän päälle neljäsosa siitä vedestä, joka pumpataan pintavalutuskentälle. Talviaikana pumpatusta vedestä kymmenesosan oletettiin jäävän pintavalutuskentälle. Hirvinevalla eroamat pumpaamon ja mittapadon välisissä virtaamissa olivat huomattavasti suuremmat kuin alun perin oletettiin.

Vaikka Hirvinevalla suhde pumpaamon ja mittapadon virtaamien välillä on erilainen kuin Joutsuolla, pitää kuitenkin huomioida aineiston määrä. Hirvinevalla pumpaamon virtaamatietoja on kerätty vasta vuosi, kun vastaavasti Joutsuolla pumpaamon virtaamatietoja on saatavilla vuoden 2016 elokuusta lähtien. Tämän vuoksi laskelmissa päädyttiin käyttämään suhteita, jotka on määritelty Joutsuon kohteen perusteella.

Vaikka keskiarvovirtaamat antavat oikean kokoluokan tuloksia pumpatulle vesimäärälle, mediaanivirtaama mittapadolla on huomattavasti pienempi. Kuvassa 4.12 on esitetty elokuun 2017 keskiarvovirtaamat mittapadolla. Kuvasta on nähtävillä, että päivät 5-9 nostavat mittapadon virtaaman keskiarvoa huomattavasti. Punaisella katkoviivalla on merkitty mediaani ja mustalla katkoviivalla kuukauden keskiarvo.



**Kuva 4.12.** Elokuun 2017 päivittäiset keskiarvovirtaamat Hirvinevalla.

Suurin osa vedestä on virrannut päivinä, jolloin päivän keskiarvovirtaama on ollut korkea. Nämä päivät myös nostavat keskiarvoa huomattavasti. Joten vaikka kuukauden keskiarvovirtaaman perusteella pienen pumpun kapasiteetti pitäisi riittää, suurin osa pumpattavasta vedestä pumpataan muutaman päivän aikana. Pumppauksen keskittyessä vain muutamahan päivään, pienen pumpun kapasiteetti ei riitä pumppaamaan vettä yksin ja suuren pumpun on pumpattava.

Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että noin puolet tai sitä enemmän pumpattavasta vedestä pitää pumpata suuremmalla virtaamalla kuin mihin pienen pumpun kapasiteetti riittää. Sulamisvesien aikana vain pieni osa voidaan pumpata pienen pumpun kapasiteetilla ja vain noin 20 prosenttia voidaan pumpata pelkän aurinkosähköjärjestelmän voimin. Tämän myötä aurinkosähköjärjestelmän mitoitus ei voida suorittaa pelkästään keskiarvovirtaaman mukaan, koska tämä ei ota huomioon pumppaustarpeen keskittymistä vain muutaman päivän osalle.

#### 4.4 Mallin muokkaus investointilaskelmiin

Mallin tarkastamisessa kävi ilmi, että kaikkien soiden keskiarvovirtaamien kautta määritetyt kuukausikeskiarvovirtaamat Hirvinevalle ovat todellisuutta korkeammat. Skaalalla kyseiset keskiarvovirtaamat arvolla 0.62, päästiin lähelle todellisuutta vastaavia arvoja. Vaikka keskiarvovirtaamat olivat samassa luokassa skaalauksen jälkeen Hirvinevan todellisten arvojen kanssa, niitä ei voida suoraan soveltaa pumppaustarpeen määrittelyyn. Keskiarvovirtaamat eivät ottaneet huomioon sitä, että pumppaustarve keskittyi usein vain muutamalle päivälle. Näinä päivinä pienen pumpun kapasiteetti ei riitä veden pumppaamiseen yksin.



Kesäkuukausina noin puolet pumpattavasta vedestä pumpataan muutaman päivän aikana. Pienen pumpun kapasiteetti ei riitä näinä aikoina, joten suuren pumpun on pumpattava yhtäaikaaisesti pienen pumpun kanssa. Tämä lisättiin malliin niin, että kesäkuukausien, eli toukokuu - lokakuu välillä asetettiin rajoitus, joka sallii aurinkosähköjärjestelmän pumpata vain puolet kaikesta vedestä yksin. Loput vesimäärästä pumpataan pienen ja suuren pumpun yhteispumppauksella.

Ajanjakso, jolloin pienen pumpun kapasiteetti ei riitä pumppaukseen, on suurin keväällä sulamisvesien aikaan. Sulamisvesijaksot kestävät noin kaksi viikkoa ja tänä aikana suuren pumpun on käytävä lähes jatkuvasti, jotta turvetuotantoalueelle ei muodostuisi tulvatilannetta. Mallissa sulamisvesijakson oletetaan tapahtuvan huhtikuussa ja tälle kuukaudelle malliin asetettiin oletus, että pieni pumppu kykenee yksin pumppaamaan 20 prosenttia kokonaisvesimäärästä ja loput pumpataan yhdessä suuren pumpun kanssa.

Talvikuukausien aikana ei esiinny vesisateita, jolloin suuren pumpun olisi käytävä. Tämän vuoksi talvikuukausien suhteen malliin ei tehty rajoituksia pumppaukseen. Lisäksi aurinkovoimajärjestelmä tuottaa pienelle pumpulle vain muutaman pumpputunnin, joten rajoitukselle ei ole tarvetta.

Järjestelmän osalta mallissa jätettiin huomioimatta aurinkosähköjärjestelmän taajuusmuuttajan vaikutus. Tutkimuksen aikana havaittiin, että pienillä virtaamilla vesien pumppauksessa dynaamisen nostokorkeuden osuus on pieni. Kokonaisnostokorkeus pienillä virtaamilla muodostuu lähes täysin staattisesta nostokorkeudesta. Tämän myötä taajuusmuuttajan hyödyt ovat minimaaliset, toisin kuin voisi alustavasti olettaa affiniteettilain perusteella.

Affiniteettilakia sovellettiin tilanteessa, jossa pumppuja käytetään samanaikaisesti. Affiniteettilain soveltaminen ottaa huomioon pienen pumpun tuoton pienentyneen virtaaman tilanteessa, jossa suuri pumppu käy yhtäaikaaisesti. Tämä ei kuvasta täysin pumpun todellista virtaamaa, koska staattisen nostokorkeuden osuus pumppauksesta on suurempi, mutta antaa hyvän osviitan pumpun tuoton muutoksista eri tilanteissa.

Aurinkovoimajärjestelmän tuottama teho voidaan muuttaa kaavojen 7 ja 9 perusteella pumpun virtaamaksi. Kaavassa esitettävä kokonaisnostokorkeus kuvastaa tässä tapauksessa staattista nostokorkeutta. Muutoksen myötä malliin ei tarvitse valita oikeita pumppuja, vaan pumppuja voidaan mallintaa pelkästään sähköisen tehon vaatimuksen mukaan. Pumppujen oletetuksi hyötysuhteeksi määritettiin 0.75 ja sähkömoottorin hyötysuhteeksi 0.8, jotka ovat samassa luokassa pienten pumppujen hyötysuhteiden kanssa, joita alustavasti harkittiin investointilaskelmiin.

Aurinkosähköjärjestelmä itsestään on pitkän aikavälin investointi ja vuosien myötä sen kennoston energiankeräyskyky heikkenee. Kennostovalmistajat lupaavat yleensä, että kennosto tuottaa vähintään 80 prosenttia 25 vuoden päästä uuteen kennostoon verrattuna.

Jos kennoston hyötysuhde on heikompi kuin tämä, kennosto oletetaan vialliseksi. Compendium of photovoltaic degradations rates -artikkelissa todetaan, että kennostojen ke-  
räyskyky heikkenee noin yhden prosentin vuoden aikana (Jordan;Kurtz;VanSant;&  
Newmiller, 2016). Jos aurinkovoimajärjestelmä olisi akuton järjestelmä 4.68 kWp ken-  
nolla, jolla sähköistettäisiin 2 kW kuormaa, kykenisi ensimmäisenä vuonna tuottamaan  
kuormalle 635 pumpputuntia. Jos kennoston energiantuotto heikkenee 20 prosenttia, jär-  
jestelmä kykenee tuottamaan kuormalle vain 356 pumpputuntia. Lopullisissa laskelmissa  
kennoston heikentyminen ajan saatossa oletettiin olevan 0.8 prosenttiyksikköä vuodessa.

Malliin tehtävät muutokset pumppujen osalta mahdollistavat useamman järjestelmävaih-  
toehdon vertailun keskenään. Kun mukaan otetaan nostokorkeuden muutos, voidaan ar-  
vioida pumppauskäytäntöjen vaikutus aurinkovoimajärjestelmältä vaadittavaan tehoon.  
Lisäksi kennoston heikentymisen huomioonotta voidaan arvioida järjestelmän soveltu-  
vuus pitkällä aikavälillä. Tehdyt muutoksen antavat aikaisempaa todenmukaisemman tu-  
loksen investointirajan määrittystä varten.

#### 4.4.1 Investointirajan määrittäminen

Investointirajan määrittämisessä oli pyrkimys määrittää raja, jossa investointi aurinkovoi-  
majärjestelmään on kannattavaa. Investoinnin kannattavuuslaskelmassa vertailtiin aggre-  
gaattipumppaamoa ilman aurinkosähköjärjestelmää ja sen kanssa. Soveltamalla nykyar-  
vomenetelmän kaavaa 3, muodostettiin investoinnin nykyarvon määrittämiseen käytetty  
kaava tutkimuksessa. Tämä on esitetty kaavassa 12.

$$NVP = \sum_{t=1}^n \frac{k_D - k_A}{(1+i)^t}, \quad (12)$$

jossa  $NVP$  on investoinnin nykyarvo,  $k_D$  on kustannukset pelkällä aggregaattijärjestel-  
mällä vuonna  $t$ ,  $k_A$  on kustannukset aurinkojärjestelmällä vuonna  $t$  ja  $i$  on käytetty las-  
kentakorko.

Investoinnin kannattavuus on riippuvainen monesta eri tekijästä, jotka vaikuttavat inves-  
tointirajan suuruuteen. Suurin yksittäinen tekijä investoinnin kannattavuuden osalta on  
dieselaggregaatin käyttämä polttoaineen määrä. Aurinkovoimajärjestelmällä pyritään vä-  
hentämään pumppaamalla käytettävän aggregaatin käyttöä, joka pienentää käytetyn polt-  
toaineen määrää. Polttoaineen hinnannousu nostaisi aurinkovoimajärjestelmän investoin-  
nin kannattavuutta. Vastaavasti polttoaineen hinnan alentuminen laskee investoinnin kan-  
nattavuutta.

Polttoaineen hinta ei ole kasvanut systemaattisesti vuosien aikana. Euroopan komission  
aineiston perusteella ajoneuvojen polttoaineen hinta on ollut 0.94 €/l vuonna 2015 ja hinta  
oli 1.16 €/l vuonna 2017. Polttoaineen hinta ei ole noussut systemaattisesti, vaan hinnalla  
on ollut nouse- ja laskusuhdanteita. Tämän myötä päädyttiin käyttämään muutamaa eri  
skenaariota, jotka kuvastavat polttoaineen hinnan nousua. Vapon aineiston perusteella

dieselaggregaateissa käytetyn polttoaineen hinta on ollut 1 €/litra. Tätä käytettiin tutkimuksessa tehdyissä laskelmissa.

Polttoainesäästöjen lisäksi investoinnin kannattavuus muodostuu myös muutamasta muusta tekijästä. Dieselaggregaatin käyttöikä on käyttötunneissa ilmoitettuna 15-20 tuhatta tuntia. Vähentämällä aggregaatin käyttöä aurinkovoimajärjestelmällä, aggregaatin käyttöikä pitenee vuosissa. Uuden aggregaatin hankintakustannus on 20 000 euroa ja optimaalisessa tilanteessa säästytään aggregaatin hankinnalta. Aggregaatille tehdään myös huoltoja 500 tunnin välein, joten järjestelmäasennuksen myötä aggregaatille tullaan tekemään vähemmän huoltoja vuoden aikana. (Alatalo & Marttila, 2011)

Aurinkojärjestelmän osalta kustannustekijöitä lisää tulevaisuudessa tehtävä invertterin vaihto, joka tehdään 15 vuoden välein. Lisäksi akustollisilla järjestelmillä järjestelmän akusto tulee vaihtaa järjestelmätoimittajan mukaan 12 vuoden välein, jos akuston käyttöaste on 70 prosenttia. Suuremmalla käyttöasteella akusto pitää vaihtaa aikaisemmin. Suurempi akusto tuottaa suuremmat vaihtokustannukset kuin pieni. Järjestelmästä on 8 kappaletta akkuja ja akuston koosta riippuen yhden akun hinta on 500-800 euroa. Akuston hinnan lisäksi tulee myös asennuskustannukset.

Järjestelmäasennus tuo lisää automatiikkaa pumppaamolle, jonka myötä etävalvonta tulee mahdolliseksi. Tämä voi tulevaisuudessa vähentää ylläpitokustannuksia, koska etävalvonta voi vähentää pumppaamolla tehtävien tarkastuskäyntien määrää. Tätä ei oteta huomioon investointilaskelmissa, koska tarkastuskäyntien määrän vähentymistä ei voida tässä vaiheessa osoittaa. Pumppaamot, jonne on asennettu aurinkovoimajärjestelmät, vaativat yhtä paljon tarkastuskäyntejä kuin tavalliset dieselaggregaattipumppaamot, joten mahdollinen väheneminen ei vaikuta kannattavuuseroon.

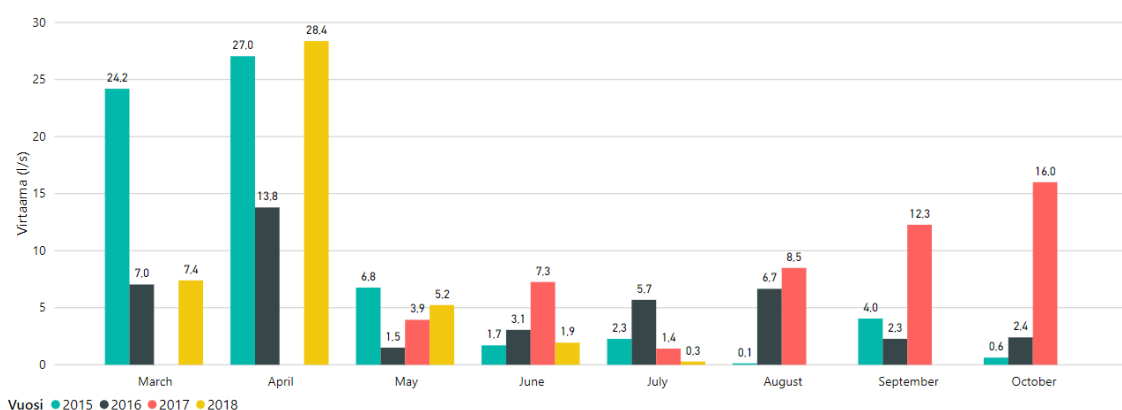
## 5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tässä luvussa esitellään työssä saavutettuja tuloksia. Aineistosta on jätetty talvikuukaudet (marraskuu – helmikuu) ulkopuolelle, koska kyseisinä kuukausina jäätyminen voi aiheuttaa virtaamamittareissa häiriöitä. Tarkastelussa käytetään sekä deduktiivista havainnointia, jossa tarkastellaan saatuja tuloksia kirjallisuudessa esitettyjen teorioiden pohjalta, että induktiivista havainnointia. Induktiivista havainnointia on käytetty vedenlaatuosiossa, jossa pyritään arvioimaan sitä, kuinka pumppaamalla tapahtuvat muutokset tulevaisuudessa vaikuttamaan turvetuotantoalueelta lähtevän veden laatuun.

### 5.1 Virtaus mittapadolla

Järjestelmien vaikutus pintavalutuskentän toimintaan aloitettiin tarkastelemalla mittapaadon virtaama-aineistoa, josta karsittiin virtaamat, jotka ovat suuremmat kuin 80 l/s. Tarkasteltavan virtaaman rajausta tehtiin siksi, että virtaamamittari voi joissain tilanteissa antaa virheellisen mittaustuloksen.

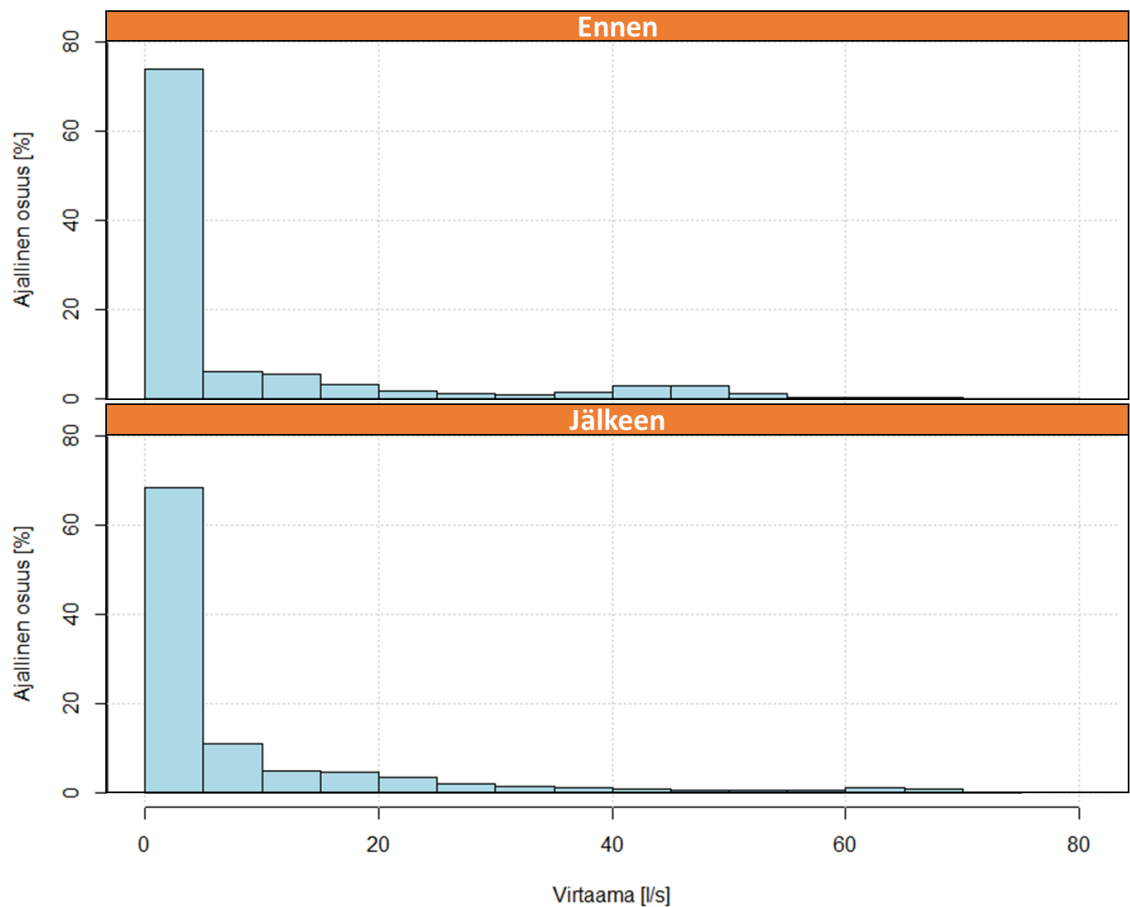
Turvetuotannossa virtaamien tarkastelu on suoritettu virtaaman aritmeettisella keskiarvolla, jota käytetään myös pintavalutuskentällä tapahtuvan veden viipymän laskentaan (Klöve, ym., 2012). Kuvassa 5.1 on vedetty yhteen Hirvinevan kuukausittaiset keskivirtaamat eri vuosilta. Vuodet 2015 ja 2016 ovat ennen aurinkosähköjärjestelmän asennusta. Vuodet 2017 ja 2018 ovat järjestelmän asennuksen jälkeen.



**Kuva 5.1.** Kuukausittaiset keskiarvovirtaamat eri vuosilta.

Kuvaaja osoittaa haasteen virtaamatiетоjen analysoinnista keskiarvovirtaamien perusteella. Keskiarvovirtaamista ei ole nähtävissä selkeää linjaa, jonka perusteella voisi arvioida järjestelmän vaikutusta keskiarvovirtaamiin. Lisäksi, kun virtaamatiетоja tarkastellaan kyseisessä tapauksessa kuukausitasolla, pumppaamomuutoksia ei pystytäkään havaitsemaan selkeästi. Tämä johtuu siitä, että vaikka pumppaus tapahtuisi eri tavalla järjestelmän myötä, pumpattava vesimäärä ei kuitenkaan muutu. Joten pidemmän aikavälin virtaaman aritmeettisen keskiarvon tarkastelussa keskiarvossa ei tapahdu muutoksia.

Havaitaksemme järjestelmien vaikutusta mittapadon virtaamiin, mittapadon virtaamajakaumaa pitää tarkastella ennen ja jälkeen järjestelmän asennusta. Kuvassa 5.2 on esitetty Hirvinevan kohteelta virtaamajakauma ennen ja jälkeen järjestelmäasennusta. Kuvaajasta voidaan havaita se, että virtaamajakauma on muuttunut aurinkovoimajärjestelmän ja pienen pumpun myötä. Kuvaajasta on nähtävissä se, että virtaamaprofiili on jakaantunut aikaisempaa suuremmaksi. Aikaisemmin nähtävillä osuus 40 – 50 l/s alueella, joka on suuren pumpun nimellisvirtaama, on siirtynyt pienempänä osuutena suuremmille yli 60 l/s virtauksille. Virtaaman kasvu on luonnollista, koska pumppaamon pumppauskapasiteettiä kasvaa pienemmän pumpun asennuksen myötä.



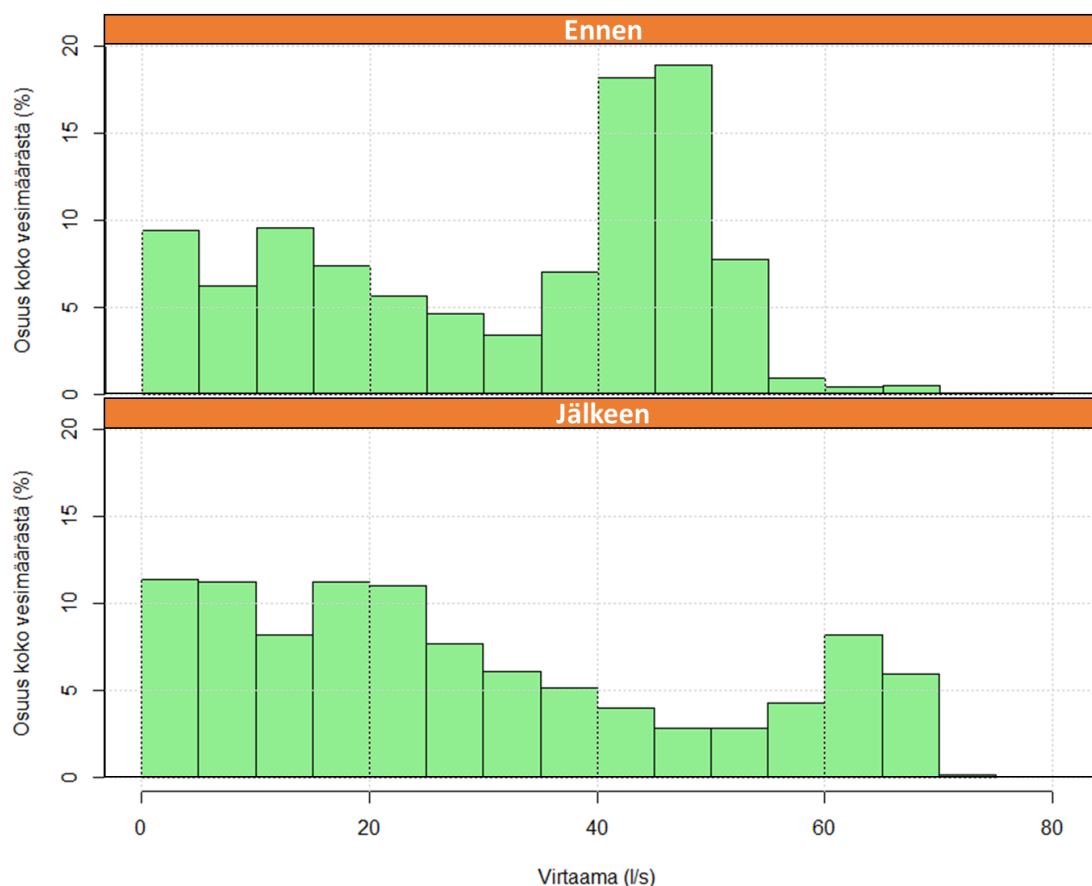
**Kuva 5.2.** Lähtevän veden ajallinen jakaantuminen virtaaman eri suuruuksille ennen järjestelmän asennusta ja asennuksen jälkeen.

Kuvaajan 5.2 perusteella keskiarvovirtaamissa ei ole nähtävissä selkeitä muutoksia ennen ( $\bar{x} = 6.9$  l/s) ja jälkeen ( $\bar{x} = 7.1$  l/s) järjestelmän asennusta. Kuvasta 5.2 voidaan tehdä myös se johtopäätös, että virtaamajakaumat eivät ole normaalijakautuneet. Virtaamien normaalijakautuneisuus testattiin myös Anderson-Darlingin testillä. Testi vahvisti oletuksen siitä, että virtaamat eivät olet normaalijakautuneet.

Yhtenä perusajatuksena tutkimuksen alussa oli se, että järjestelmä ei vaikuttaisi oleellisesti keskiarvovirtaamiin. Koska virtaamat eivät ole normaalijakautuneet, testiksi valikoitui Mann-Whitney testi. Testistä saatu p-arvo ( $<0.05$ ) viittaa siihen, että virtaamien

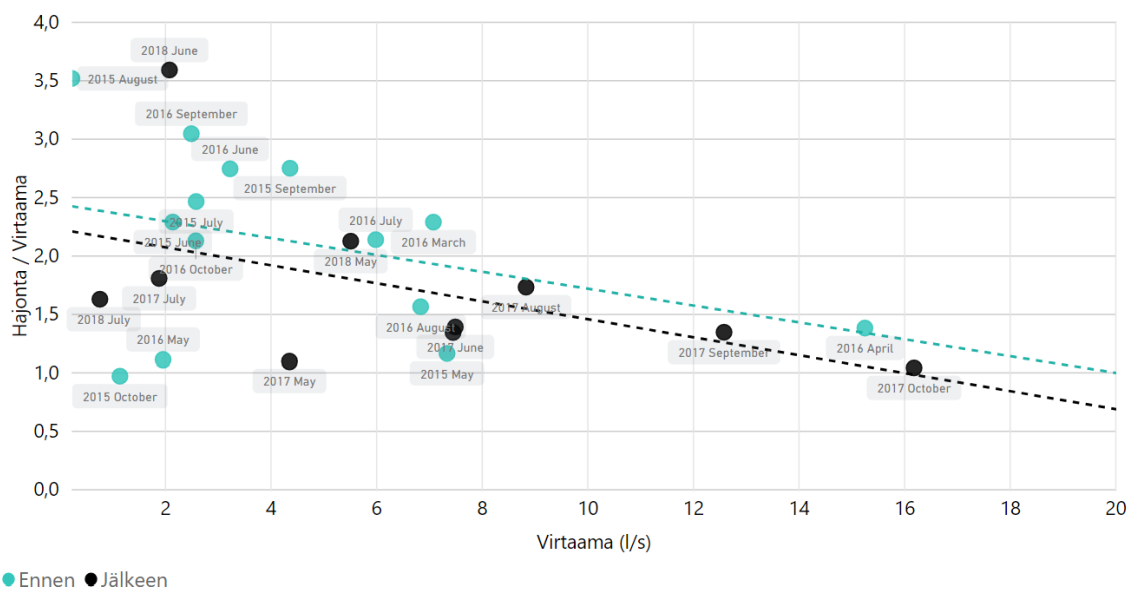
keskiarvoissa nähtävät eroavaisuudet ennen ja jälkeen järjestelmän asennusta ovat tilastollisesti merkitsevät. Se, että virtaamien keskiarvoissa on havaittavissa eroavaisuuksia, johtuu todennäköisesti ulkopuolisista tekijöistä. Näitä tekijöitä voi olla esimerkiksi sulamisvesistä muodostuvat eroavaisuudet tai säästä muodostuvat tekijät.

Virtaamaprofiilin muutos mittapadolla on selkeämmin nähtävissä kuvasta 5.3, jossa kuvataan virranneen veden määrää eri virtauksilla. Kuvaajasta on nähtävillä se, että entistä suurempi osa pumpatusta vedestä virtaa suuremmalla virtaamalla pintavalutuskentältä luontoon.



**Kuva 5.3.** Lähtevän veden vesimäärän jakaantuminen virtaaman eri suuruuksille ennen järjestelmän asennusta ja asennuksen jälkeen.

Lisäksi, koska kuva 5.3 osoittaa eroavaisuuden ajallisesta virtaamajakaumassa, järjestelmän voidaan olettaa muuttaneen virtaaman vaihteluväliä. Virtaaman vaihteluvälin tapahtuva muutos on havaittavissa mittapadon virtaaman hajonnassa muutoksena. Kuvassa 5.4 on esitetty mittapadon virtaaman hajonnassa suhdetta virtaamaan kuukausittain virtaaman keskiarvon funktiona ennen ja jälkeen järjestelmän asennuksen.



**Kuva 5.4.** Mittapadon virtaaman hajonta virtaaman funktiona ennen järjestelmän asennusta ja tämän jälkeen.

Luodut kuvaajat viittaavat siihen, että järjestelmän myötä asennettu pikkupumppu on vaikuttanut mittapadolta lähtevän veden virtaamaprofiiliin. Tämän myös on nähtävillä virtauksen hajonnan muutoksessa; ennen ( $\sigma = 13.0$ ,  $n = 46,552$ ) ja jälkeen ( $\sigma = 12.4$ ,  $n = 27,209$ ) järjestelmän asennusta. Virtaaman hajonnan eroavaisuuden tilastollista merkitsevyyttä ennen ja jälkeen järjestelmän asennusta tarkastettiin Leneven testillä. Testillä testataan kahden erisuuruksen joukon varianssien samansuuruisuutta (Biostats, 2018). Testistä saatu p-arvo ( $<0.05$ ) vahvisti tilastollisen merkitsevyyden hajonnan eroavaisuudessa ja voimme todeta, että aurinkovoimajärjestelmä pienentää mittapadolta lähtevän virtaaman hajontaa.

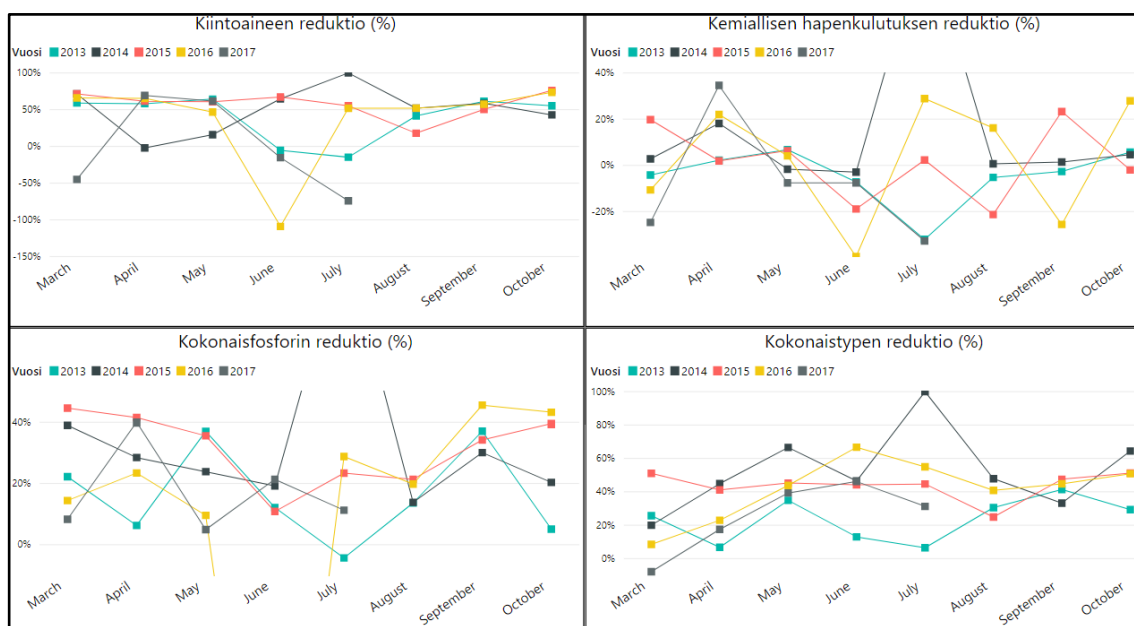
Eroavaisuudet, jotka ovat havaittavissa visuaalisen ja numeerisen analysoinnin kautta, tukevat tutkimuksen alussa muodostettua hypoteesia siitä, että pumppaustavan muutos pienentää pintavalutuskentältä lähtevän virtaaman hajontaan. Tämän myötä virtaamasta tulee tasaisempaa. Vaikka kaikkia vaikuttavia tekijöitä ei pystytä rajaamaan tutkimuksen myötä, muutokset mittapadolta lähtevän virtaaman osalta ovat niin selkeitä, että pumppaustavan voidaan todeta vaikuttavan mittapadon virtaamaprofiiliin vähentämällä mittapadolta mitattavien virtaamapiikkejä ja tasaamalla lähtevän veden virtausta.

## 5.2 Muutokset vedenlaadussa

Vedenlaadun tutkimuksen tarkastelukohteina olivat kiintoaineen, kokonaisfosforin, kokonaistypen ja kemiallisen hapenkulutuksen määrässä tapahtuvat muutokset sekä reduktiot pintavalutuskentällä. Tasaisemman pumppauksen vaikutusta vedenlaatuun tarkastettiin tutkimalla Joutsuon turvetuotantoalueen vedenlaaturaportteja ja virtausdataa. Joutsuon turvetuotantoalueen pumppaamolle on asennettu taajuusmuuttaja ilman aurinkosäh-

köjärjestelmää, jonka on todettu vaikuttavan pintavalutuskentältä lähtevän veden virtausprofiiliin. Muutokset ovat samantapaisia kuin Hirvinevalla aurinkosähköjärjestelmällä. Joutsuolla järjestelmämuutos on tehty ennen Hirvinevan aurinkovoimajärjestelmää ja sen toiminta on ollut varmempaa, jonka myötä kerätty aineisto on myös luotettavampaa.

Jos tasaisemmalla pumppauksella on vaikutusta vedenlaatuun, sen pitäisi olla havaittavissa Joutsuon vedenlaaturaporteissa. Tarkastelu aloitettiin visuaalisen analyysin keinoin. Kuvassa 5.5 Joutsuon turvetuotantoalueen pintavalutuskentällä tapahtuneet reduktiot vuosilta 2013-2017. Kyseiseen kohteeseen asennettiin taajuusmuuttaja vuoden 2016 toukokuussa.

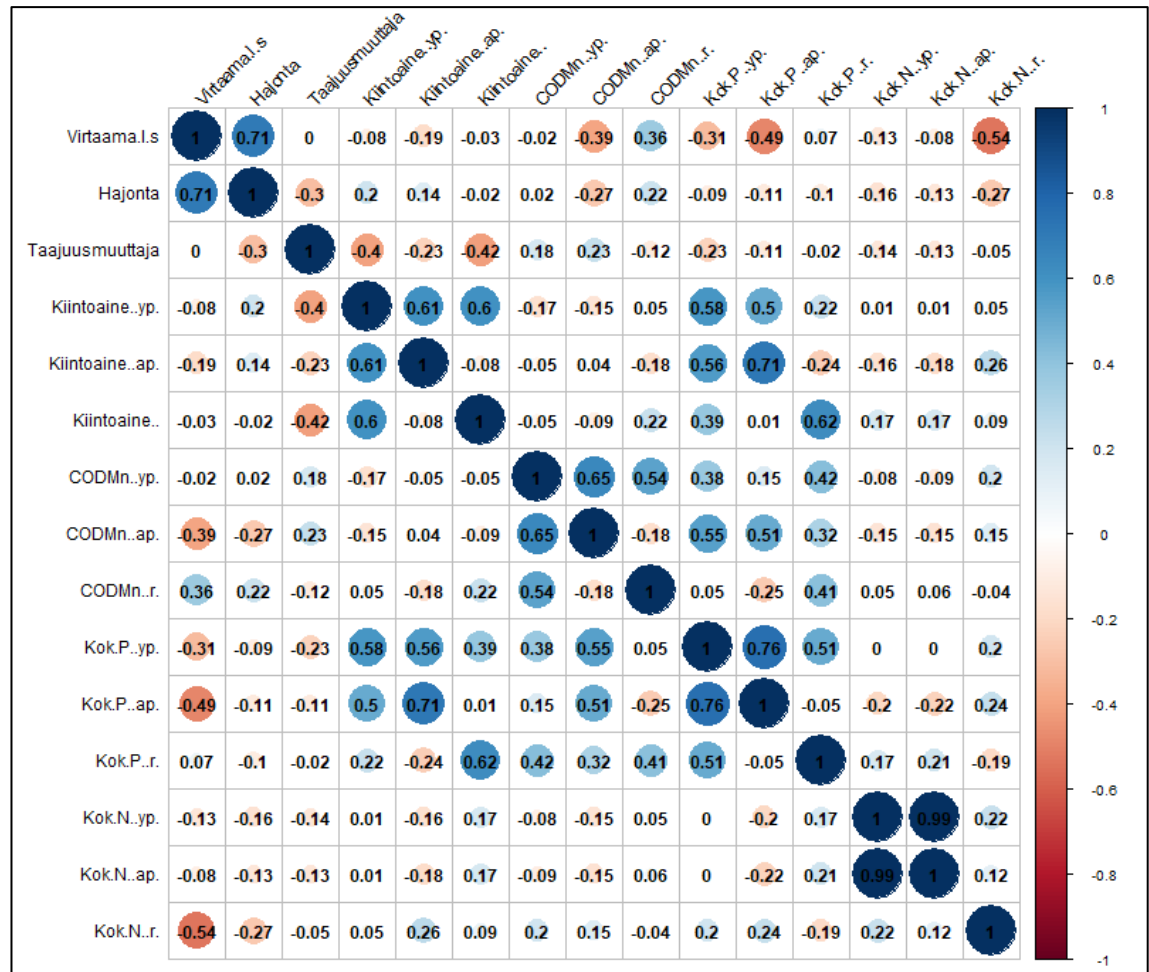


**Kuva 5.5.** Reduktiot tarkasteltavista arvoista vuosilta 2013-2017.

Kuvaajien perusteella on vaikeaa muodostaa johtopäätelmää siitä, onko taajuusmuuttajalla vaikutusta reduktioon. Sama havainto tuli esiin myös, kun tarkasteltiin pumppualltaan ja mittapadon pitoisuuksia kiintoaineen, kokonaisfosforin, kokonaistypen ja kemiallisen hapenkulutuksen osalta.

Visuaalisen havainnoinnin menetelmien kautta ei kyetty havaitsemaan muutoksia vedenlaadun osalta. Tästä johtuen muutosta vedenlaadussa pyrittiin havaitsemaan korrelaatioiden kautta, joissa tarkasteltiin muuttujien välistä riippuvuutta toisiinsa. Korrelaatioanalyysi on esitetty kuvassa 5.6. Kuvaajassa esitetään muuttujien välistä riippuvuutta, jossa sininen väri kuvastaa positiivista korrelaatiota ja punainen väri negatiivista korrelaatiota. Mitä suurempi ja vahvempi väri pallolla on, sitä suurempi on riippuvuus kyseisten muuttujien välillä. Lukuarvo kertoo korrelaation suuruudesta, 1 viittaa täysin positiiviseen korrelaatioon ja -1 viittaa täysin negatiiviseen korrelaatioon.





**Kuva 5.6.** Taajuusmuuttajan vaikutuksen tarkastelu vedenlaatuun.

Kuvaajan perusteella taajuusmuuttajalla vaikuttaa olevan lievää korrelaatiota kiintoaineen osalta. Korrelaatio viittaa siihen, että jos järjestelmässä on taajuusmuuttaja, kiintoainearvot sekä ylä- että alapadolla pienenevät. Tämä pitää paikkansa myös hajonnan ja kiintoaineen välisellä korrelaatiolla, jonka mukaan virtaaman suuremmalla hajonnalla kiintoainepitoisuudet ovat suuremmat. Korrelaatioanalyysi muodostettiin myös Hirvinevan kohteen osalta, jonne aurinkosähköjärjestelmä ja pieni pumppu asennettiin. Tulokset olivat linjassa Joutsuon tulosten kanssa.

Saatujen tulosten perusteella ei vaikuta siltä, että pumppumuutoksilla kyettäisiin tehostamaan pintavalutuskentän toimintaa. Tulokset ovat samansuuntaisia kuin Sillanpään teke-mässä pro gradussa, jossa todettiin, että virtaaman vaikutus pintavalutuskentällisiltä koh-teilta lähtevän veden laatuun oli vähäinen suhteessa virtaaman muutoksiin. (Sillanpää, 2016)

### 5.3 Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmän kannattavuus

Hirvinevan turvetuotantoalueella aurinkosähköjärjestelmällä sähköistetään 2 kW pumppu. Järjestelmässä on 335 Ah akku ja kennoston koko on 4.68 kWp. Järjestelmän

on määritetty olevan kannattava, jos laskettava investointiraja on pienempi kuin 37 tuhatta euroa. Jos investointiraja tulee olemaan suurempi kuin tämä, investointi ei ole kannattava. Investointiraja on määritetty Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmän hankinnasta muodostuneiden kustannusten perusteella.

Ennen järjestelmän asennusta pumppaamon kapasiteetilla on tuotettu 50 l/s virtaama. Virtaama on tuotettu pumpulla, jonka akseliteho on 5.3 kW ja jota sähköistetään dieselaggregaatilla. Aurinkosähköjärjestelmän asennuksen jälkeen pumppaamolle on lisätty pieni pumppu, jota sähköistetään järjestelmän tuottamalla energialla. Pienen pumpun tuotto on ollut 13 l/s, kun pumppua on pyöritetty pumpun nimellisellä pyörimisnopeudella. Asennuksen jälkeen pumppaamon kapasiteetti on kasvanut pienen pumpun myötä ja pumput tuottavat yhdessä 58 l/s virtaaman.

Kuten aikaisemmin havaittiin, virtausvastus kasvaa kuutiollisesti virtausnopeuteen verrattuna. Vaikka aurinkosähköjärjestelmällä sähköistetty pumppu tuottaa 13 l/s virtaaman pumpun pumpatessa yksin, pumppaus kahden pumpun voimin ei kasvata pumppaamon virtaamaa yhtä paljoa. Pumppaamon virtaaman kasvua rajoittaa virtausvastus, joka kasvaa suuremman virtaaman myötä.

Järjestelmän kannattavuus muodostuu siitä, että järjestelmän myötä kyettäisiin vähentämään aggregaatin käyttöaikaa, joka on suoraan verrattavissa suuren pumpun käyntiaikoihin. Kun Hirvinevan pumppaamon toimintaa tutkittiin, ilmeni, että pienen pumpun kapasiteetti ei riitä veden pumppaukseen pintavalutuskentälle tilanteissa, joissa pitää pumpata suuri vesimäärä lyhyessä ajassa. Myös virtaamaprofiili, joka on esitetty kuvassa 5.3, viittaa siihen, että suuri osa vedestä pitää pumpata suurilla virtausnopeuksilla. Myös kuvasta 4.12 havaitaan, että kuukauden aikana suurin pumppaustarve keskittyy muutaman päivän ajalle. Näissä tilanteissa pienen pumpun kapasiteetti ei riitä pumppaamaan vettä yksin ja suurta pumppua on käytettävä.

Koska pumpattava vesimäärä ei jakaannu tasaisesti, pienen pumpun pumppaama vesimäärä on pienempi kuin alustavasti odotettiin. Sinä aikana, kun Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmä on ollut käytössä, järjestelmä on pumpanut yksin vain 9 prosenttia siitä vesimäärästä, joka on pumpattu pintavalutuskentälle. Luodun mallin perusteella arvioitiin, että pieni pumppu kykenisi pumppaamaan yksin 17 prosenttia koko vesimäärästä. Tarkasteluajanjakson aikana on ollut järjestelmähäiriöitä, jotka ovat vähentäneet pienen pumpun käyntiä. Tästä johtuen pieni pumppu ei ole toiminut niin kuin mallissa on oletettu. Ilman häiriöitä pienen pumpun pumppaama osuus koko vesimäärästä olisi suurempi ja lähestyisi mallista saatua arvoa.

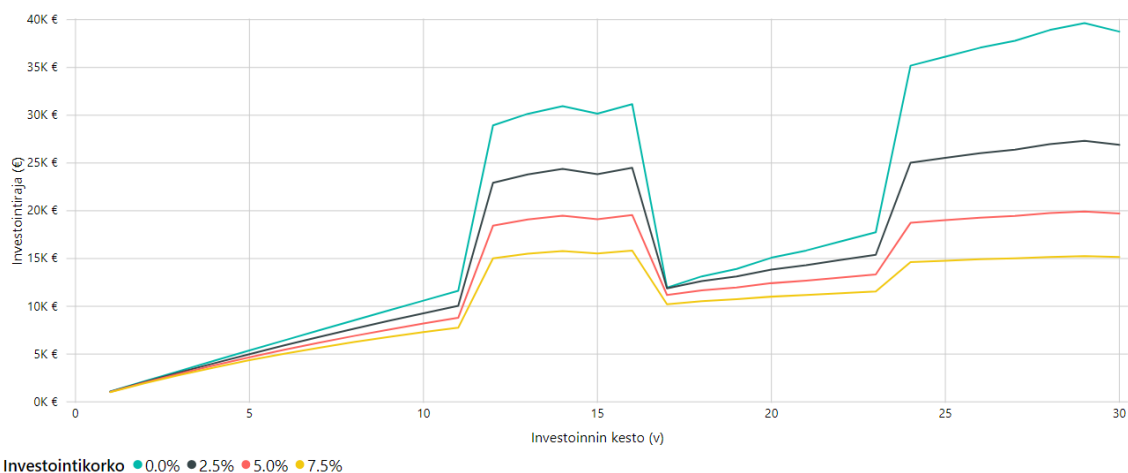
Aurinkoenergian turvin pumpatun vesimäärän lisäksi aggregaatin käyttötunteja pienentää pumppaamon pumppauskapasiteetin kasvu pienen pumpun myötä. Luodun mallin perusteella aggregaatin käyttötunnit olisivat 29 prosenttia pienemmät kuin ilman järjestelmää.

Tarkasteluajanvälin aikana ilman uutta järjestelmää aggregaatin käyttötunnit olisivat olleet 1257 tuntia ja järjestelmän kanssa aggregaatin käyttötunnit olivat 1014 tuntia. Aggregaatin käyttötunnit olivat tarkasteluajanvälin aikana 19 prosenttia pienemmät. Tuntimäärät olisi ollut pienempi, jos järjestelmä olisi toiminut ilman häiriöitä.

Vaikka aggregaatin käyttöä kyettäisiin vähentämään mallin ennustamalla 29 prosentilla, tämä ei tarkoita sitä, että käytetyn polttoaineen määrä pienenesi yhtä paljon, koska aggregaatilla sähköistetään suuren pumpun lisäksi myös aurinkosähköjärjestelmän pumppua ja akustoa. Suuremman kuorman myötä aggregaatti kuluttaa enemmän polttoainetta kuin ennen järjestelmähankintaa. Oletuksena oli se, että polttoainetta kuluu järjestelmäasennuksen jälkeen puoli litraa enemmän tunnissa kuin ennen järjestelmäasennusta.

Hirvinevalta kerätyn aineiston perusteella mallin tuottamat säästöennusteet ovat korkeammat kuin mitä tarkasteluajan tulokset osoittavat. Säästöennuste pitäisi paremmin paikaansa, jos aurinkosähköjärjestelmän toiminnassa ei olisi häiriöitä, kuten mallia luodessa on oletettu. Jos järjestelmähäiriöiden vaikutus jätetään huomioimatta, mallista saadut tulokset aurinkoenergialla pumpatun veden osuudesta ja aggregaatin käytön vähentymisestä verratessa mittaustuloksiin antavat kustannusvertailua varten tarpeeksi tarkat tulokset.

Tarkasteluajanvälin perusteella ei voida ottaa kantaa siihen, kuinka paljon kennoston keräyskyky heikkenee ajan myötä. Kennoston keräyskyvyn heikentyminen otettiin kuitenkin huomioon mallin toiminnassa. Heikentynyt keräyskyky johtaa siihen, että Hirvinevalla aurinkoenergialla pumpatun veden osuus kokonaisvesimäärästä pienenee 17 prosentista 15 prosenttiin 30 vuoden aikana. Tätä pienentymistä tulee paikkaamaan aggregaatti, joka sähköistää pientä pumppua ja lataa akustoa. Kun kennoston heikentyminen ja järjestelmän myötä muodostuvat huoltokustannukset otetaan huomioon, pystytään laskemaan investointiraja järjestelmälle. Investointirajat ovat esitetty kuvassa 5.7, jossa esitetään investointiraja eri investointien pituuksilla ja investointikoroilla.



**Kuva 5.7.** Investointirajat Hirvinevan järjestelmälle laskettuna eri investointikoroilla.

Aurinkosähköjärjestelmällä kyettään vähentämään aggregaatin vuosittaisia käyttötunteja. Ilman aurinkosähköjärjestelmää aggregaatin vaihto tapahtuisi aikaisemmin kuin järjestelmän kanssa. Kuvassa vuonna 12 nähtävä nousu investointirajassa viittaa siihen, että aggregaatti tulee vaihtaa ilman järjestelmää kyseisenä vuonna. Järjestelmän myötä aggregaatti tarvitsee vaihtaa vasta vuonna 17. Ilman järjestelmähankintaa vuonna 12 tehtävä aggregaattivaihdon lisäksi aggregaatti tulee vaihtaa myös vuonna 24. Järjestelmän myötä Hirvinevan turvetuotantoalueelle tarvitaan 30 vuoden aikana yksi aggregaatti vähemmän kuin mitä vaaditaan ilman järjestelmähankintaa.

Jos järjestelmän myötä tulevia säästöjä ei diskontata nykypäivän arvoon, järjestelmä tuottaisi 39 tuhannen euron säästöt 30 vuoden aikana. Tämä tarkoittaisi sitä, että järjestelmä maksaisi itsensä takaisin, mutta se ei tuota merkittäviä säästöjä. Kun laskelmissa otetaan huomioon investointikorko, investointirajan suuruus pienenee. Investointikorkona voidaan käyttää mitä tahansa arvoa ja sen valinta on riippuvainen investoinnin halutusta tuotosta. Jos investointikorkona käytettäisiin 5 prosenttia, investointiraja olisi 30 vuoden aikatahtimella 20 tuhatta euroa.

Luodun mallin perusolettamus on se, että aurinkosähköjärjestelmä toimii häiriöttä koko 30 vuoden ajan. Alussa havaitut ongelmat viittaavat siihen, että tähän ei ole mahdollista päästä. Lisäksi, jos ympäristön lämpötila laskee liikaa, akustot täytyy väliaikaisesti siirtää muualle jotta niiden elinikä ei lyhene kylmyyden vaikutuksesta. Tätä ei ole otettu huomioon mallin luonnissa. Järjestelmällä voi olla jäännösarvoa 30 vuoden päästä, mutta sen arvo tulee olemaan vähäinen. Joten voidaan todeta se, että Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmä ei ole ollut kannattava investointi.

Jos polttoaineen hinta 1 €/l nousisi 1.5 €/l, investoinnin investointiraja ilman investointikorkoa nousisi 51 tuhanteen euroon. Jos huomioon otetaan investointikorko, 5 prosentin korolla investointiraja olisi 27 tuhatta euroa. Joten vaikka polttoaineen hinta nousisi huomattavasti, aurinkosähköjärjestelmä ei muutu kannattavaksi Hirvinevan kohteella kun investointikorko otetaan huomioon.

Kannattamattomuus muodostuu siitä, että suurin osa pumpattavasta vedestä pitää pumpata lyhyellä aikavälillä. Tämä vaatii pumppaamolta suurta kapasiteettia. Vesimäärän jakaantuminen lyhyelle aikavälille on parhaiten nähtävissä kuvassa 4.12, jossa esitettiin Hirvinevan mittapadon keskiarvovirtaamat elokuun 2017 päivinä. Kun vettä pitää pumpata paljon lyhyessä ajassa, pienen pumpun kapasiteetti ei riitä pumppaukseen ja suurta pumppua on käytettävä.

## 5.4 Optimaalinen järjestelmä kuivatusvesien pumppaukseen

Jotta optimaalinen järjestelmä kuivatusvesien pumppaukseen kyettäisiin määrittämään, täytyy ensin määrittää, mitä kriteerejä järjestelmälle asetetaan. Tutkimuksessa havaittiin,

että vaikka Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmän pitäisi tuottaa energiaa kaikissa tilanteissa, todellisuudessa näin ei ole. Suurempien vesimassojen aikana sekä suurella että pienellä pumpulla pitää pumpata vettä. Suuren pumpun käydessä myös aggregaatti käy ja järjestelmän teknisen ratkaisun takia aggregaatti tuottaa energiaa aurinkosähköjärjestelmän akustolle ja pienelle pumpulle. Tämä johtaa siihen, että aurinkosähköjärjestelmän tuottamaa energiaa ei kyetä hyödyntämään, koska aggregaatti tuottaa järjestelmälle energian. Tilanne tulee vastaan niin suurempien sateiden, kuin keväällä lumien sulamisvesien aikana. Näistä syistä johtuen optimaalisen järjestelmän mitoittaminen päätettiin tehdä kuivatusvesien perusteella.

Ensimmäiseksi piti valita sopiva pumppu kuivatusvesien pumppaukseen. Tutkimuksen aikana harkittiin kolmea eri pumppukokoa, joista jo tutkimuksen aikana karsittiin suurin pumppu (3.1 kW) tutkimuksen ulkopuolelle. Tämän tuotto oli liian suuri, jotta se kykenisi tuottamaan tasaista virtaamaa pintavalutuskentälle, joten valinta tehtiin 1.4 kW:n ja 2 kW:n pumpujen välillä. Pienemmällä pumpulla kyettäisiin mitoittamaan pienempi aurinkosähköjärjestelmä. Jos nostokorkeus huomioitaisiin pelkästään fyysisen nostokorkeuden perusteella, 1.4 kW pumppu olisi riittävä. Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmän pumpun kokonaisnostokorkeus on suurempi kuin mitä aikaisemmin on sen oletettu olevan. Pumpulta vaadittu nostokorkeus tässä tilanteessa on 1.4 kW pumpun nostokorkeuden ylärajan lähetyvillä ja pumppu ei välttämättä kykenisi pumppaamaan vettä. Tämän vuoksi 2 kW:n pumppu on ainoa vaihtoehto aurinkosähköjärjestelmälle.

Se, että kannattaako aurinkosähköjärjestelmän olla akullinen vai akuton, määritettiin tutkimuksessa luodulla mallilla. Tutkimuksen aikana havaittiin, että akustollinen järjestelmä kykenee tuottamaan enemmän käyttötunteja kuin akuton järjestelmä. Tutkimuksessa havaittiin myös, että akuston suurentaminen ei tuota suurta hyötyä. Tämä osoittautui todeksi myös järjestelmän pienelle pumpulle tuottamista hyödyllisissä käyttötunneissa. Taulukossa 5.1 on esitetty, kuinka paljon käyttötunteja eri kennosto- ja akustovaihtoehdot tuottaisivat 2 kW:n pumpulle ensimmäisenä vuotena.

**Taulukko 5.1.** Aurinkosähköjärjestelmän tuottamat käyttötunnit 2 kW pumpulle.

Akusto (Ah)	2600	3120	3640	4160	4680	5200	5720	6240	6760	7280	7800	8320	8840
0	0	0	46	163	278	389	492	581	669	753	825	887	943
275	710	852	994	1115	1234	1345	1426	1506	1575	1634	1680	1721	1751
370	708	852	994	1115	1235	1351	1437	1525	1599	1661	1713	1747	1780
460	709	850	994	1113	1234	1351	1444	1536	1615	1680	1728	1765	1804

Alkuinvestointina akuton järjestelmä on noin 10 tuhatta euroa pienempi kuin akullinen järjestelmä. Akuttomaan järjestelmään ei myöskään muodostu akuston vaihtamisesta muodostuvia kustannuksia pitkällä aikavälillä. Pienen pumpun käyttötunneissa nähtävä ero akuttoman ja akullisen järjestelmän välillä on niin suuri, että tästä muodostuvat

säästöt aggregaatin käytöstä tekevät akullisesta järjestelmästä kuitenkin kannattavamman kuin akuttomasta järjestelmästä. Näiden havaintojen myötä optimaalisessa aurinkosähköjärjestelmässä tulee olla akku, jonka kapasiteetti on 275 Ah.

Sopivan kennoston mitoittamisessa järjestelmälle pitää ottaa huomioon, että kennoston täytyy kyetä tuottamaan tarpeeksi käyttötunteja 2 kW pumpulle kuivatusvesien pumppaamiseen. Jos päivän keskiarvovirtaamaksi halutaan saada 3.5 l/s, joka on hiukan suurempi kuin Hirvinevan päivien keskiarvovirtaamien mediaani (3 l/s) 2017 elokuulta, 2 kW pumpun pitää pumpata kyseisenä kuukautena 6.5 tuntia vuorokaudessa. Tämän perusteella järjestelmän pitää kyetä tuottamaan 200 pumpputuntia pienelle pumpulle. Pienin kennosto, joka kykenee tähän, on kooltaan 5.72 kW<sub>p</sub>. Kun huomioidaan, että aggregaatti syöttää energiaa järjestelmään suurien vesimassojen aikana, kennosto voidaan mitoittaa astetta pienemmäksi, mikä tällöin olisi 5.2 kW<sub>p</sub>.

Hirvinevan kohteen tietojen perusteella optimaalinen järjestelmä turvetuotannon kuivatusvesien pumppaukseen olisi 2 kW pumppu 275 Ah akustolla ja 5.2 kW<sub>p</sub> kennostolla. On kuitenkin huomioitava, että Hirvinevan kohteella pieni pumppu ei toimi tällä hetkellä kuten on oletettu. Jos pumppaus toimisi miten sen on odotettu toimivan, olisi järjestelmä reippaasti ylimitoitettu. Pumpun tuotto olisi nimittäin 13 l/s sijasta 22.5 l/s. Tämä johtuu siitä, että pumpun käynnistysraja pidetään alhaalla. Koska pumppualtaan vedenpinnan korkeus halutaan pitää mahdollisimman alhaalla. Se nostaa pumpun nostokorkeutta ja jotta kokonaisnosto saataisiin pienennettyä, käynnistysrajaa pitäisi nostaa. Muutoksen myötä olisi mahdollista mitoittaa pienempi pumppu (1.4 kW) ja kennosto (4.16 kW<sub>p</sub>).

## 6. POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä luvussa peilataan tässä tutkimuksessa laadittua optimaalisen aurinkosähköjärjestelmän mitoitusmenetelmää aikaisemmissa tutkimuksissa esitettyihin menetelmiin. Lisäksi luvussa tarkastetaan vedenlaatuosion tutkimuksen tuloksia ja sitä, miten tulokset ovat linjassa aikaisempiin tutkimuksiin. Tämän jälkeen esitellään optimaalinen aurinkosähköjärjestelmä kuivatusvesien pumppaukseen ja se, mikä data-analyysin rooli oli tutkimuksessa. Sen jälkeen esitetään tutkimuksessa muodostetut johtopäätökset siitä, soveltuuko aurinkosähköjärjestelmällä toteutettava pumppaus turvetuotannon kuivatusvesien pumppaukseen. Lopussa arvioidaan tutkimusta ja esitellään tutkimuksen myötä ilmennyt jatkotutkimuskohde.

### 6.1 Mitoitusprosessi

Meteorologiset ilmiöt ovat suurimmat vaikuttavat tekijät aurinkovoimajärjestelmän tuottamaan energian määrään (Muhsen;Khatib;& Nagi, 2017). Koska aikaisemmat tutkimukset olivat toteutettu eteläisemmissä ilmastoissa, tutkimuksissa käytetyt meteorologiset tekijät eivät ole verrattavissa Suomen olosuhteisiin. Mitoitusprosessi optimaalisen aurinkosähköjärjestelmän löytämiseen piti toteuttaa Suomessa kerätyllä meteorologisella aineistolla. Aurinkosähköjärjestelmät, nostokorkeudet ja virtaamat olivat myös erilaisia aikaisempiin tutkimuksiin verrattuna.

Tutkimuksessa kehitettiin mitoitusprosessi optimaalisen aurinkosähköjärjestelmän löytämiseksi turvetuotannon kuivatusvesien pumppaukseen. Tutkimuksessa ilmeni, että vaikka järjestelmän mitoittamisessa on mahdollista hyödyntää eri menetelmiä, mitoituksen alussa tehtävä vaatimusmäärittäminen ja kuormitustyyppien määrittäminen ovat tärkeässä osassa menetelmän valitsemisessa. Jos tavoitteena on mahdollisimman suuri järjestelmän luotettavuus, intuitiivinen menetelmä on nopea ja yksinkertainen tapa järjestelmän mitoittamiseen. Kyseistä menetelmää olikin hyödynnetty projektin myötä asennettujen aurinkosähköjärjestelmien mitoittamisessa. Tutkimuksen aikana havaittiin kuitenkin, että intuitiivista menetelmää ei ole mahdollista hyödyntää aurinkosähköjärjestelmän mitoittamisessa turvetuotannon kuivatusvesien pumppauksen energianlähteeksi.

Asennetut järjestelmät ovat havaintojen perusteella ylimitoitettuja tarpeeseensa nähden. Tästä johtuen järjestelmät eivät kykene tuottamaan alustavien olettamuksien mukaisia säästöjä. Kun mitoitusprosessia tarkastettiin, havaittiin, että näiden mitoittamisessa oli tukeuduttu keskiarvoihin. Mitoittamisen aikana ei oltu huomioitu, että kuivatusvesien pumppaus ei tapahdu tasaisesti, vaan suurin pumppaustarve on hetkellistä. Tästä johtuen järjestelmät ovat ylimitoitettuja. Intuitiivisen mitoitusmenetelmän ongelma on havaittu

myös maanviljelyssä. Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelussa on todettu, että keskiarvolliset menetelmät eivät sovellu aurinkosähköjärjestelmän mitoittamiseen vesienpumpaukseen maanviljelyssä ja menetelmää hyödyntämällä ei ole mahdollista mitoittaa optimaalista järjestelmää (Glasnovic & Margeta, 2007). Tutkimuksen aikana tehty havainto tukee myös Rawatin, Kaushikin ja Lamban tekemää olettamusta siitä, että intuitiivista menetelmää käytettäessä usein yliarvioidaan aurinkosähköjärjestelmän koko ja tarvittavat energiavarastot (Rawat;Kaushik;& Lamba, 2016).

Järjestelmän mallintamisessa on tärkeää ymmärtää, että jokainen komponentti on mallinnettava oikein, jotta luotu malli vastaa todellista järjestelmää. Esimerkiksi tutkimuksen aikana ilmeni, että affiniteettilakia ei ole mahdollista hyödyntää pumppaamon mallintamisessa, vaikka menetelmää oli hyödynnetty Bouzidin (2013) tekemässä tutkimuksessa (Bouzidi, 2013). Jotta affiniteettilakia pystyttäisiin soveltamaan, dynaamisen nostokorkeuden osuus kokonaisnostokorkeudesta pitäisi olla suuri. Turvetuotannossa kokonaisnostokorkeus muodostuu suurimmaksi osaksi staattisesta nostokorkeudesta, joten affiniteettilakia ei voida soveltaa turvetuotannon vesien pumppauksessa.

Affiniteettilain myötä ilmennyt eroavaisuus aikaisempiin tutkimuksiin korostaa sitä, että aurinkosähköjärjestelmä kannattaa mitoittaa tapauskohtaisesti. Tällöin kyetään vastaamaan Muhsenin, Khatibin ja Naginin (2017) esittämiin haasteisiin aurinkosähköjärjestelmän mitoittamisessa. Näitä ovat esimerkiksi järjestelmien suunnittelukäytänteet, mallintamis- ja ohjausmenetelmät, saatava data ja asennuspaikalla ilmenevät haitat. (Muhsen;Khatib;& Nagi, 2017)

## 6.2 Veden virtaama ja vedenlaatu

Tutkimuksen hypoteesi siitä, että lähtevän veden virtaamaprofiili muuttuu järjestelmäasennuksen myötä, osoittautui paikkansapitäväksi. Tämä osoittautui todeksi niin visuaalisten havaintojen kuin tilastollisten testien perusteella. Sen vaikutusta ei kuitenkaan pystytty todistamaan pintavalutuskentän vedenkäsittelyn tehostamisessa. Vaikka aurinkosähköjärjestelmä pienentää hiukan lähtevän veden virtaaman hajontaa, sillä tai keskiarvolla ei vaikuta olevan vaikutusta pintavalutuskentän vesienkäsittelyyn.

Tulos vastaa Sillanpään (2016) Pro Gradussa saatua tulosta siitä, että valuman vaikutus lähtevän veden laatuun on vähäinen (Sillanpää, 2016). Myös Sulka -hankkeen yhteydessä toteutetut tutkimukset viittaavat siihen, että virtaamassa tapahtuvat muutokset eivät ole yhteydessä pintavalutuskentän vesienkäsittelyyn. Tämän myötä voidaan olettaa, että pintavalutuskentän rakenteet vaikuttavat suurimmaksi osin lähtevän veden vedenlaatuun, eikä pumppaustavalla ei ole niinkään vaikutusta pintavalutuskentän toimintaan. Tutkimustuloksista on kuitenkin huomioitava, että on olemassa monia eri tekijöitä, joka vaikuttavat pintavalutuskentän kykyyn puhdistaa turvetuotantokentältä valuvaa vettä.



Pumppaus pintavalutuskentälle tapahtuu järjestelmämuutoksen myötä pienemmällä virtaamalla kuin aikaisemmin, joten on todennäköistä, että ajan myötä pintavalutuskentällä olevat oikovirtaukset pienenevät. Pumppaustavan muutoksen vaikutuksesta pintavalutuskentän vesienpuhdistuskyky voi siis parantua järjestelmäasennuksen myötä hiljalleen. Tutkimukseen käytetty aika oli liian lyhyt havaitsemaan näitä muutoksia, koska muutosten ilmenemiseen voi mennä vuosia.

### 6.3 Optimaalinen järjestelmä

Turvetuotannon vesien pumppaukseen on haastavaa määrittää optimaalista aurinkosähköjärjestelmää. Haasteen muodostaa se, että pumppaustarve ei ole tasainen vaan syklinen. Jos optimaalista järjestelmää mietitään investoinnin kannattavuuden kautta, järjestelmä, joka pienentää eniten aggregaatin polttoaineen käyttöä, on optimaalisin järjestelmä. Tarkasteltavan aurinkosähköjärjestelmän ongelma on, että suurempien vesimassojen aikaan järjestelmää ei kyetä hyödyntämään. Näissä tilanteissa suuren pumpun, jota sähköistetään aggregaattilla, on pumpattava vettä. Kun aggregaattia käytetään, tuottaa se energiaa aurinkosähköjärjestelmän akustolle ja sen pienelle pumpulle, joten kennoston tuottamaa energiaa ei hyödynnetä. Tämä johtaa siihen, että mahdollinen polttoainesäätö näissä tilanteissa ei muodostu aurinkosähköjärjestelmän tuottamasta energiasta, vaan siitä, että aggregaattia käytetään aikaisempaa tehokkaammin.

Tutkimuksessa päädyttiin siihen tulokseen, että aurinkosähköjärjestelmä kannattaa mitoittaa pienten virtaamien mukaan, eli kuivatusvedelle, jota valuu jatkuvasti turvetuotantokentältä pumppualtaaseen. Pumppaus on tehokkainta silloin, kun aurinkosähköjärjestelmällä sähköistettävää pumppua käytetään mahdollisimman pitkään. Kolmesta pumppuvaihtoehdosta (1.4 kW ja 2.0 kW, ja 3.1 kW) 3.1 kW:n pumppu kyettiin rajaamaan pois vaihtoehdoista. Pumpun tuottama virtaama oli liian suuri kuivatusvesien pumppaukseen tasaisella virtaamalla ja se olisi johtanut siihen, että järjestelmän muut komponentit täytyisi myös mitoittaa suuremmiksi, mikä tietäisi suurempia alkuinvestointeja.

Tutkimuksessa päädyttiin siihen, että jos turvetuotantoalue vastaa Hirvinevaa, optimaalinen järjestelmä olisi 2 kW:n pumppu, jota sähköistetään aurinkosähköjärjestelmällä, jossa on 275 Ah:n akusto ja 5.2 kW<sub>p</sub>:n kennosto. Järjestelmän pumpun kapasiteetti riittää veden pumppaukseen nostokorkeudella, joka Hirvinevalla havaittiin ja muu järjestelmä kykenee tuottamaan tarpeeksi käyttötunteja pumpulle, jotta se kykenee pumppaamaan turvetuotantokentältä valuvan kuivatusveden.

On kuitenkin huomioitavaa, että Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmän pumppausta olisi mahdollista tehostaa nostamalla pienen pumpun käynnistysrajaa. Tämä mahdollistaisi pienemmän pumpun ja kennoston mitoittamisen. Optimaalinen järjestelmä käynnistysrajan muutoksen jälkeen olisi 1.4 kW pumppu, jota sähköistettäisiin aurinkosähköjärjestelmällä 275 Ah akustolla ja 4.16 kW<sub>p</sub> kennostolla.

## 6.4 Data-analyysin rooli mitoituksessa

Data-analyysi jaettiin neljään eri vaiheeseen; valmisteluun, esikäsittelyyn, analyysiin ja jälkikäsittelyyn. Näistä valmistelu ja esikäsittely ovat työläitä, mutta luovat pohjan analyysien muodostamiseen. Erityisesti aineistojen yhdistäminen useasta eri lähteestä on työläs prosessi, mutta yhdistämällä aineistoja on mahdollista tuottaa parempi kuva datasta ja tunnistaa yhteyksiä eri tekijöiden välillä. Jos valmistelun ja esikäsittelyn vaiheissa epäonnistutaan tai tehdään virheellisiä toimia, analysointiin päätyy virheellistä dataa. Tämä voi pahimmassa tapauksessa johtaa virheellisten havaintojen/johtopäätösten luomiseen.

Tässä tutkimuksessa yhdistettiin aineistoja, jotka oli kerätty virtaamamittareilta, aurinkosähköjärjestelmistä, vedenlaaturaporteista ja sääasemilta. Yhdistämällä nämä aineistot toisiinsa kyettiin luomaan kuva siitä, kuinka suuren osan vedestä pienellä pumpulla kyetään pumppaamaan, miten vesimäärät pumppaamalla ja mittapadolla suhtautuvat toisiinsa, ja kuinka pitkään menee, että pumppaus on mahdollista havaita mittapadon virtaamassa. Näiden havaintojen muodostaminen ei olisi ollut mahdollista ilman aineistojen yhdistämistä. Aineistojen yhdistämiseen vaadittiin se, että aineistoista kerättyä dataa muutettiin oikeaan muotoon, jotta aineistojen kyettiin yhdistämään toisiinsa.

Datan visualisoinnilla on mahdollista tehdä havaintoja huomattavasti helpommin kuin pelkästä numeraalisesta datasta. On kuitenkin tärkeää huomioda se, että kuten Berinato (2016) esitti, aineiston visualisointiin vaikuttaa myös aineiston laatu. Vaikka käsiteltävästä aiheesta ei ole aikaisempaa tietämystä/ymmärrystä, se on mahdollista visualisoida, mutta jos aineistoa ei ymmärrä, visuaalisessa havainnoinnissa voi muodostaa vääriä johtopäätöksiä tai huomio kiinnittyy vääriin tekijöihin. Lisäksi, mitä enemmän informaatiota pyritään tuomaan esille yhdellä kuvaajalla, sen tärkeämpää on etsiä oikea visuaalinen esitystapa. Tässä Abelan (2013) esittämä visuaalisen suunnittelun prosessi ja mahdolliset esitystavat datalle auttavat paljon.

Tutkimuksessa data-analyysin rooli korostui silloin, kun analysoitiin pumppaamon toimintaa. Pumppaamon toiminta vaikutti aurinkosähköjärjestelmän mitoittamismenetelmän valintaan. Eri menetelmien muodostuvat eroavaisuudet havaittiin tutkimuksessa myös käytännössä. Aikaisemmat järjestelmämitoitukset oli suoritettu eri menetelmällä kuin mitä tässä tutkimuksessa käytettiin. Aikaisemmin mitoittamisessa oli sovelluttu suoraan induktiivisista menetelmää ja näissä ei oltu huomioitu kuorman laatua. Kun pumpusta analysoitiin, ilmeni, että järjestelmän mitoittamisessa pitää hyödyntää analyttistä menetelmää. Tutkimuksessa käytetyn menetelmän ansiosta oli mahdollista mitoittaa optimaalinen aurinkosähköjärjestelmä turvetuotannon kuivatusvesien pumppaukseen.

## 6.5 Johtopäätelmät

Asetettu säästöodotukset Hirvinevan aurinkosähköjärjestelmälle eivät tule toteutumaan. Investointi järjestelmään on tämän tutkimuksen mukaan tappiollinen, koska järjestelmä

ei kykene vähentämään tarpeeksi aggregaatin käyttöä. Tärkein syy on se, että suurin pumppaustarve muodostuu lumien sulamisvesistä ja sateista. Nämä vedet pitää pumpata lyhyellä aikavälillä pumppualtaasta pintavalutuskentälle, sillä muuten pumppuallas alkaa tulvia. Vesi, joka aurinkosähköjärjestelmän sähköistämällä pumpulla kyetään pumppaamaan yksin, muodostuu turvetuotantokentältä valuvasta kuivatusvedestä. Tämä on parhaassakin tapauksessa vain 30 prosenttia kokonaisvesimäärästä. Kun huomioon otetaan, että järjestelmä ei kykene esimerkiksi toimimaan talvella, osuus on tätä pienempi.

Putkistosta muodostuva virtausvastus pienentää pumppujen tuottamaa virtaamaa, kun vettä pitää pumpata yhtäaikaaisesti suurella ja pienellä pumpulla. Tästä johtuen pienen pumpun lisäys tulvatilanteissa ei tuota suurta hyötyä. Lisäksi, kun aggregaatti on käytössä, syöttää se energiaa aurinkosähköjärjestelmään. Näissä tilanteissa aurinkokennoston tuottamaa energiaa ei kyetä hyödyntämään. Esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmästä saatavan datan perusteella 2018 huhtikuussa aggregaatti tuotti 80 prosenttia pienen pumpun käyttämästä energiasta ja loput tuotettiin aurinkosähköjärjestelmällä. Myös pumppaamolta mitattavat virtaamat vahvistavat tämän.

Jotta aurinkosähköjärjestelmä soveltuisi turvetuotannon vesien pumppaukseen, kuivatusveden määrä pitäisi olla suurempi tai vesienkäsittelyrakenteisiin pitäisi kyetä varastoitmaan enemmän vettä. Tästä johtuen on haastavaa löytää turvetuotantoaluetta, jolle aurinkosähköjärjestelmällä toteutettava pumppaus soveltuisi. Pienemmällä turvetuotantoalueella turvetuotantokentältä valuvan kuivatusveden määrä on pienempi kuin Hirvinevalla. Tässä tilanteessa järjestelmä ei kykenisi maksamaan itseään takaisin. Turvetuotantoalueen ollessa suurempi, turvetuotantoalueelle sijoitetaan useampia vesienkäsittelyrakenteita. Tämän myötä käsiteltävän veden määrä yhdellä vesienkäsittelyrakenteella pienenee ja tullaan samaan tilanteeseen kuin pienemmän turvetuotantoalueen tapauksessa.

Tilanne, jossa aurinkosähköjärjestelmä voisi teoriassa maksaa itsensä takaisin, vaatisi spesiaalit olosuhteet. Joko turvetuotantokentältä valuvan kuivatusveden määrä pitäisi olla keskimääräistä suurempi tai turvetuotantoalueella pitäisi olla lähde tai lähteitä. Molemmissa tilanteissa pumppaustarpeen määrä olisi suurempi pienillä pumppauskapasiteeteilla, joka tukisi aurinkosähköjärjestelmällä toteutettavan pumppauksen investointia. Tämä on hyvä muistaa, jos on löydettävissä runsaslähteinen turvetuotantoalue.

Tutkimuksen johtopäätökset aurinkosähköjärjestelmän soveltuvuudesta kuivatusvesien pumppaukseen ovat seuraavat: vaikka aurinkosähköjärjestelmä pienentää hiukan lähtevän veden virtaaman hajontaa, virtaaman pienentyneellä hajonnalla ei näytä olevan vaikutusta pintavalutuskentän vesienkäsittelyyn. Tämän lisäksi aurinkosähköjärjestelmä ei kykene maksamaan itseään takaisin pitkällä aikavälillä, joten investointi aurinkosähköjärjestelmään ei ole kannattavaa. Pumppausta olisi mahdollista tehostaa muuttamalla pumpun käynnistysrajoja, jonka jälkeen optimaalinen järjestelmä olisi 1.4 kW pumppu, jota sähköistettäisiin aurinkosähköjärjestelmällä 275 Ah akustolla ja 4.16 kW<sub>p</sub> kennosolla.

Tutkimuksen aikana havaittiin, että data-analytiikan rooli voidaan hyödyntää aurinkosähköjärjestelmän mitoittamisessa parhaiten silloin, kun määritetään aurinkosähköjärjestelmän kuormitusta. Data-analyttisillä menetelmillä kyetään määrittämään, että mikä on sopivin menetelmä optimaalisen aurinkosähköjärjestelmän mitoittamiseen, jolloin saadaan tarkemmat tulokset.

Aurinkosähköjärjestelmän sijasta pumppaamoiden kustannuksien säästöjä kannattaisi tavoitella keskittymällä pumppaamojen aggregaatteihin ja niiden mitoituksiin. Tutkimuksen aikana ilmeni, että usealle turvetuotantoalueelle on sijoitettu liian suuri aggregaatti sähköistämään pumppua. Ylisuuren aggregaatin myötä aggregaatin käyttämä polttoainemäärä on suurempi kuin mitä se olisi oikein mitoitetulla aggregaatilla. Aggregaatin pienentämisellä kyettäisiin pienentämään pumppauksesta syntyviä kustannuksia ilman merkittäviä järjestelmämuutoksia.

## 6.6 Tutkimuksen arviointi ja jatkotutkimusaiheet

Tutkimuksessa muodostui haasteeksi se, että etukäteen ei ollut selkeää kuvaa siitä, miten pumppaustarve painottuu. Tämä asetti haasteen järjestelmän mallintamiselle ja mitoittamiselle, koska järjestelmän kuorma on kriittisessä osassa järjestelmämitoituksessa. Puutteellisen informaation takia tutkimuksessa täytyi käyttää epätavallisia menetelmiä pumppaustarpeen selvittämiseen. Järjestelmän mallintamisessa keskityttiin paljon järjestelmän komponentteihin ja niiden teknisiin ominaisuuksiin. Haastavissa tilanteissa data-analyysin ja visuaalisen havainnoinnin keinot auttoivat ymmärtämään pumppausta ja olivat tärkeässä roolissa koko tutkimuksen ajan. Näiden avulla oli mahdollista analysoida luodun simulaation toimintaa ja paikkansapitävyyttä.

Vaikka tutkimuksessa johtopäätös oli, että aurinkosähköjärjestelmä ei ole kannattava ratkaisu kuivatusvesien pumppauksessa, tutkimuksessa ilmeni sellaista informaatiota, jota voidaan käyttää tulevaisuudessa turvetuotannossa. Keskiarvovirtaamat, jotka laskettiin turvetuotantoalueen pinta-alaa kohden eri kuukausilta, auttavat tarkempien investointilaskemien laatimisessa pumppaamoratkaisujen suunnittelun yhteydessä. Keskiarvovirtaamien avulla voidaan määrittää aikaisempaa tarkemmin se, missä tilanteessa kannattaa investoida aggregaatilla käytettävään pumppaamoon ja milloin pumppaamo kannattaa liittää sähköverkkoon.

Tämän lisäksi tutkimuksessa havaittiin, että Joutsuon turvetuotantoalueen perusteella pumpatusta vedestä 25-35 prosenttia jää pintavalutuskentälle. Reduktiolaskuissa, joissa lasketaan vedessä tapahtuvan ainepitoisuuksien pienentyminen pintavalutuskentälle tulevasta ja lähtevästä vedestä, pintavalutuskentälle jäävää veden määrää ei oteta huomioon. Jos vesimäärän pienentyminen pintavalutuskentällä otettaisiin huomioon reduktiolas-kuissa, pintavalutuskentän toiminta olisi selkeästi tehokkaampaa kuin mitä reduktiolas-kuissa antavat ymmärtää. Tämä myös antaisi paremman kuvan siitä, kuinka paljon kiintoainetta, rautaa, typpeä, fosforia ja orgaanista ainetta pintavalutuskenttä oikeasti pidättää.

Tutkimus nosti esille myös uuden näkökannan turvetuotannon vedenlaadun analysointiin. Aikaisemmissa tutkimuksissa vedenlaadun tarkastelu on toteutettu tukeutumalla lähtevän veden virtaaman keskiarvoihin. Tattarin, Koskiahon ja Kosusen (2014) esittämässä turvetuotannon kuormituslaskelmasuosituksissa kaikissa menetelmissä käytetään näytteenotopäivältä lähtevän veden virtaaman keskiarvoa ainevirtaamien määrittämisessä (Tattari; Koskiahon; & Kosunen, 2014). Tässä tutkimuksessa nousi esille se, että keskiarvolla ei voida kuvastaa pumppaustapaa. Kahdella eri pumppaustavalla on mahdollista saada sama keskiarvo lähtevälle virtaamalle virtaamaprofiilien ollessa erilaiset. Tästä johtuen olisi mielenkiintoista tutkia lisää sitä, onko lähtevän veden virtaaman hajonnalla vaikutusta veden laatuun.

## 7. LAINATUT LÄHTEET

- Abela, A. (14. Tammikuu 2013). *Advanced presentation by design*. San Francisco: Pfeiffer. Haettu 5. Elokuu 2018 osoitteesta The Extreme Presentation™ Method: <https://extremepresentation.com/design/7-charts/>
- Aggarwal, V. (2. Kesäkuu 2018). *What are the most efficient solar panels on the market?* Haettu 29. Heinäkuu 2018 osoitteesta Energysage: <https://news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/>
- Alatalo, A.;& Marttila, E. (27. Kesäkuu 2011). Pumppaamon suunnitteluohjeisto.
- Aliyu, M.;Hassan, G.;Said, S.;Siddiqui, M.;& Alawami, A. (2018). A review of solar-powered water pumping systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 61-76.
- Behrens, J. (1997). Principles and procedures of explatory data analysis. *Psychological Methods*, vol 2, 131-160.
- Berinato, S. (2016). Visualizations That Really Work. *Harvard Business Review*, Kesäkuu.
- Betnner, M. (2014). *Using accounting and Financial Information : Analyzing, Forecasting & Decision-Making*. New Yourk: Business Expert Press.
- Biostats. (19. Heinäkuu 2018). *Test for homogeneity of variances - Levene's test and the Fligner Killeen test*. Haettu 19. Heinäkuu 2018 osoitteesta Biostats: <https://biostats.w.uib.no/test-for-homogeneity-of-variances-levenes-test/>
- Bouzidi, B. (2013). New sizing method for PV water pumping systems. *Sustainable energy technologies and assessments* 4, 1-10.
- Bussi, G.;Frances, F.;Montoya, J. J.;& Y. Julien, P. (2014). *Distributed sediment yield modelling: Importance of initial sediment*. Colorado: Department of Civil Engineering, Colorado State University.
- Chandler, D.;& Munday, R. (2016). *A Dictionary of Media and Communication*. Oxford: Oxford University Press.
- Cleanwaters. (15. Tammikuu 2017). *Pintavalutuskenttä*. Haettu 9. Elokuu 2018 osoitteesta Cleanwaters: <https://cleanwaters.fi/palvelut/pintavalutuskentta>

- Department of the Environment, Transport and The Regions. (1998). *Energy savings in industrial water pumping systems*. Didcot, Oxfordshire, Yhdistynyt kuningaskunta: Energy Efficiency Enquiries Bureau.
- Ebaid, M. S.; Qandil, H.; & Hammad, M. (2013). A unified approach for designing a photovoltaic solar system for the underground water pumping well-34 at Disi aquifer. *Energy conversion management*, 780-795.
- Encyclopaedia Britannica. (18. Toukokuu 2018). *Random variables and probability distributions*. Haettu 14. Elokuu 2018 osoitteesta Encyclopaedia Britannica: <https://www.britannica.com/science/statistics/Random-variables-and-probability-distributions#ref367427>
- Euroopan Komissio. Joint Research Centre. (11. Kesäkuu 2017). *Photovoltaic geographical information system*. Haettu 17. Elokuu 2017 osoitteesta [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_download/map\\_index.html](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html)
- Ford, R. (2011). Why They Work & When They Don't - Affinity Laws. *ASHRAE Journal*, 42-43.
- Galetto, M. (20. Tammikuu 2016). *What Is Data Analysis?* Haettu 10. Lokakuu 2018 osoitteesta NGData: <https://www.ngdata.com/what-is-data-analysis/>
- Gallo, A. (19. Marraskuu 2014). *A Refresher on Net Present Value*. Haettu 8. Elokuu 2018 osoitteesta Harvard Business Review: <https://hbr.org/2014/11/a-refresher-on-net-present-value>
- Ghasemi, A.; & Zahediasl, S. (2012). *Normality Tests for Statistical Analysis: A Guide for Non-Statisticians*. Iran: Shahid Beheshti University of Medical Sciences.
- Glasnovic, Z.; & Margeta, J. (2007). A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems. *ScienceDirect*, 904-916.
- Grant High School Mathematics. (16. Elokuu 2012). *Standard deviation*. Haettu 14. Elokuu 2018 osoitteesta Statistics and Data-analysis: <https://statsdata.wordpress.com/2012/08/16/standard-deviation/>
- Hakalahti-Siren, T. (2015). *Hulevesien kestävä hallinta*. Tampere: Cleanwaters.
- Ihme, R.; Heikkinen, K.; & Lakso, E. (1991). *Pintavalutus turvetuotantoalueiden valumavesien puhdistuksessa*. Helsinki: Vesi- ja ympäristöhallitus.
- Jordan, D.; Kurtz, S.; VanSant, K.; & Newmiller, J. (2016). *Compendium of photovoltaic degradation rates*. Progress in Photovoltaics.

- Klöve, B.;Saukkoriipi, J.;Tuhkanen, T.;Heiderscheidt, E.;Heikkinen, K.;Marttila, H.;. . . Karppinen, A. (2012). *Turvetuotannon vesistökuormituksen ennakointi ja uudet menetelmät*. Helsinki: Edita Prima Oy.
- Kosara, R. (2007). *Visualization Criticism - The Missing Link Between Information Visualization and Art*. North Carolina: The University of North Carolina at Charlotte.
- Kurek, W.;& Ostfeld, A. (2014). Multiobjective water distribution systems control of pumping cost, water quality, and storage-reliability constraints. *Journal of water resources planning and management*, 184-193.
- Kurland., D. J. (2000). *Critical reading*. Noudettu osoitteesta [http://www.criticalreading.com/inference\\_analysis.htm](http://www.criticalreading.com/inference_analysis.htm)
- Long, H.;Zhang, Z.;& Su, Y. (2014). Analysis of daily solar power prediction with data-driven approach. *Applied energy* 16, 29-37.
- Luque, A.;& Hegedus, S. (2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Martire, T.;Glaize, C.;Joubert, C.;& Rouviere, B. (2008). A simplified but accurate prevision method for along the sun PV pumping systems. *Solar Energy* 82, 1009-1020.
- Menegaki, A. (2008). Valuation for renewable energy: A comparative review. *Renewable and sustainable energy reviews* 12, 2422-2437.
- Milnes, M. (29. Heinäkuu 2009). *The Mathematics of Pumping Water AECOM Design Build*. Haettu 8. Elokuu 2018 osoitteesta Royal Academy of Engineering: <https://www.raeng.org.uk/education/post-16-education/teaching-and-learning-resources/additional-mathematical-resources>
- Motiva. (2011). *Energiatohokkaan pumpun hankinta*. Helsinki: Lönnberg Painot.
- Motiva. (2011). *Energiatohokkaat pumput*. Haettu 8. Elokuu 2018 osoitteesta Motiva: [https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/kaikki\\_julkaisut/energiatohokkaat\\_pumput.9236.shtml](https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/kaikki_julkaisut/energiatohokkaat_pumput.9236.shtml)
- Muhsen, D. H.;Khatib, T.;& Nagi, F. (2017). A review of photovoltaic water pumping system designing methods, control strategies and field performance. *Renewable and sustainable energy reviews*, 70-86.
- Oja, H.;& Shevlyakov, G. (2016). *Robust Correlation : Theory and Applications*. John Wiley & Sons: Chichester.



- Postila, H.;Heikkinen, K.;Saukkoriipi, J.;Karjalainen, S.;Kuoppala, M.;Härkönen, J.;. . . Klöve, B. (2011). *Turvetuotannon valumavesien ympärisvuotinen käsittely*. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.
- Purohit, P. (2007). Financial evaluation of renewable energy technologies for irrigation water pumping in India. *Energy Policy* 35, 3134-3144.
- Rawat, R.;Kaushik, S.;& Lamba, R. (2016). A review on modelling, design methology and size optimization of photovoltaic based water pumping, standalone and grid connected system. *Renewable and sustainable energy reviews* 57, 1506-1519.
- Rodiek, J.;Best, S.;& Brandhorst, H. (2010). Data analysis of solar power installation project for Lee County'S T.K. Davis Justice Center. *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. Honolulu: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Sillanpää, J. (2016). Virtaaman vaikutus turvetuotantoalueelta lähtevän veden ainepitoisuuksiin ja kuormitukseen. Jyväskylä.
- Stoffel, B. (2015). *Assessing the Energy Efficiency of Pumps and Pump Units*. Amsterdam: Elsevier.
- Tattari, S.;Koskiahho, J.;& Kosunen, M. (2014). *Turvetuotannon kuormituslaskentasuositus ja perustelut sen käyttöönotolle*. Helsinki: Suomen Ympäristökeskus.
- The Metaphysics Research Lab. Stanford University. (29. Lokakuu 2012). *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Noudettu osoitteesta <https://plato.stanford.edu/entries/logic-inductive/>
- Väyrynen, T.;Aaltonen, R.;Haavikko, H.;Mirja, J.;Kalliokoski, K.;Niskala, A.-L.;& Tukiainen, O. (2008). Turvetuotannon ympäristönsuojeluopas. *Ympäristöopas*.
- Ympäristöministeriö. (2015). Turvetuotannon ympäristönsuojeluohje. *Ympäristöhallinnon ohjeita*.